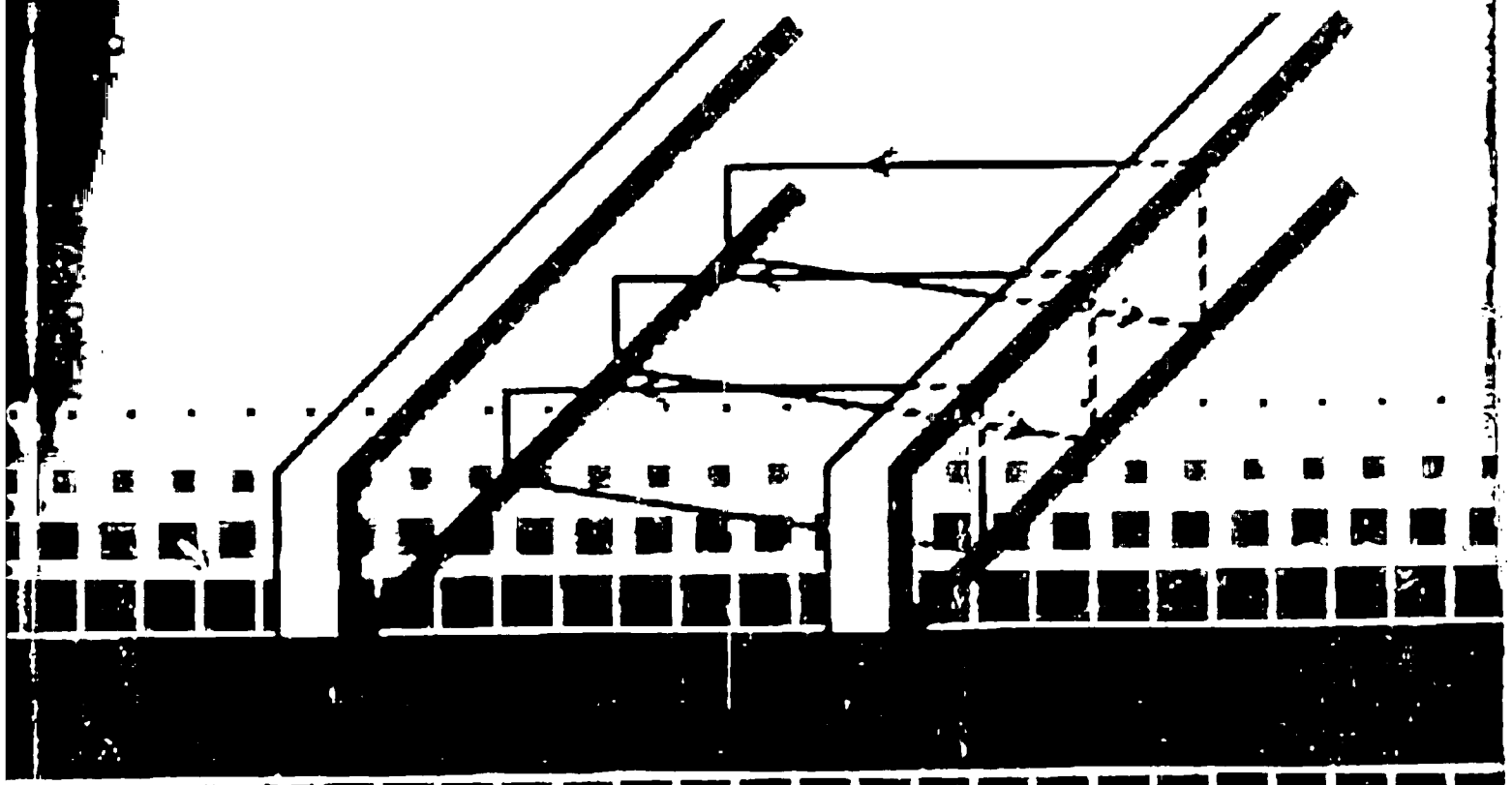
Robert Sikora

PRZETWÓRSTWO TWORZYW WIELKOCZĄSTECZKOWYCH

WYDAWNICTWO EDUKACYJNE
ZOFII DOBKOWSKIEJ

Robert Sikora

PRZETWÓRSTWO TWORZYW WIELKOCZĄSTECZKOWYCH



WYDAWNICTWO EDUKACYJNE
ZOFII DOBKOWSKIEJ

POLSKIE I MIĘDZYNARODOWE SYMBOLE LITEROWE NIEKTÓRYCH TWORZYW WIELKOCZĄSTECZKOWYCH

Azotan celulozy	CN
Kopoliestroetery	KPEE
Kopolimer chlorek winylu/ /chlorek winylidenu	VC/VDC
Kopolimer chlorek winylu/ /octan winylu	VC/VAC
Kopolimer etylen/octan winylu	E/VAC
Kopolimer etylen/propylen	E/P
Kopolimer metakrylan metylu/ /akrylonitryl	M/A
Kopolimer styren/akrylonitryl	SAN
Kopolimer styren/butadien/ /styren	SBS
Kopolimer styren/metakrylan metylu	SMM
Octan celulozy	CA
Octanomaślan celulozy	CAB
Poliakrylonitryl	PAN
Polialkohol winylowy	PVAL
Poliamidoimid	PIA
Poliamidy	PA
Poliarylany	PAR
Poliarylosulfon	PAS
Poli-1-buten	PB
Polichlorek fosforonitrylowy	PPNC
Polichlorek winylu	PVC
Polichlorotrifluoroetylen	PCTFE
Polieteroimid	PIE
Polieterosulfon	PES
Polietylen	PE
Polietylen dużej gęstości	PE-HD
Polietylen liniowy małej gęstości	PE-LLD
Polietylen małej gęstości	PE-LD
Polietylen o ultrawielkiej masie cząsteczkowej	PE-UHMW
Polifluorek winylidenu	PVDF
Polifluorek winylu	PVF
Poliformaldehyd	POM
Poliizobutylen	PIB
Poliimid	PI
Polimetakrylan metylu	PMMA
Polioctan winylu	PVAC
Polipropylen	PP
Polisiarczek fenylenowy	PPS
Polistyren	PS
Polistyren udarowy i wysoko-udarowy	PS-HI
Polisulfon	PSU
Politereftalan butylenowy	PBT
Politereftalan etylenowy	PET
Politetrafluoroetylen	PTFE
Politlenek etylenu (polioksyetylen)	PEOX
Politlenek propylenu (polioksypropylen)	PPOX
Politrioksan	POT
Poliuretany	PUR
Poliwęglany	PC
Propionian celulozy	CP
Silikony	SI
Terpolimer akrylonitryl/ /butadien/styren	ABS
Tworzywa epoksydowe	EP
Tworzywa fenolowo--formaldehydowe	PF
Tworzywa krezolowo--formaldehydowe	CF
Tworzywa melaminowe	MF
Tworzywa mocznikowe	UF
Żywice poliestrowe	UP

Robert Sikora

PRZETWÓRSTWO TWORZYW WIELKOCZĄSTECZKOWYCH

WYDAWNICTWO EDUKACYJNE
ZOFII DOBKOWSKIEJ
WARSZAWA 1993

SPIS TREŚCI

Przedmowa 9

Rozdział 1. Podstawy procesu uplastyczniania 11

1.1. Znaczenie i metody uplastyczniania 11
1.2. Ślimak — cylinder 13
1.2.1. Ślimaki w układzie jednoślimakowym 13
1.2.2. Ślimaki w układzie dwuślimakowym 21
1.2.3. Ślimaki w innych układach 25
1.2.4. Funkcje i budowa cylindra 29
1.3. Zasobnik i strefa zasypu 32
1.4. Zarys teorii układu jednoślimakowego 35
1.4.1. Strefa zasilania 36
1.4.2. Strefa przemiany 43
1.4.3. Strefa dozowania 46
1.4.4. Łączne funkcjonowanie stref 55
1.5. Zarys teorii układu dwuślimakowego 58
1.5.1. Charakterystyka fizyczna 59
1.5.2. Natężenie przepływu 63
1.6. Uplastycznianie beźślimakowe 69
1.6.1. Uplastycznianie tłokowe 69
1.6.2. Uplastycznianie tarczowe, pierścieniowe i wirnikowe 74
1.6.3. Uplastycznianie liniowe i planetarne 77
1.7. Uplastycznianie mieszane 79
1.8. Ocena efektywności procesu uplastyczniania 82
1.8.1. Wskaźniki bezpośrednie 82
1.8.2. Wskaźniki pośrednie 82
1.9. Przykłady obliczeniowe 87
Literatura 95

Rozdział 2. Metody przetwórstwa fizyczno-chemicznego I rodzaju 99

2.1. Spajanie 99
2.1.1. Zgrzewanie 99
2.1.2. Spawanie 108
2.2. Porowanie 112
2.2.1. Spiekanie 112
2.2.2. Formowanie rozrostowe 114

2.3. Rozdzielanie cieplne 119
2.3.1. Rozdzielanie tworzyw porowatych 119
2.3.2. Rozdzielanie folii 122
2.4. Suszenie i podgrzewanie 123
2.4.1. Suszenie 123
2.4.2. Podgrzewanie 126
2.5. Ulepszanie fizyczne 129
2.5.1. Ulepszanie cieplne 129
2.5.2. Ulepszanie radiacyjne 134
2.5.3. Aktywowanie 137
Literatura 142

Rozdział 3. Metody przetwórstwa fizyczno-chemicznego II rodzaju 146

3.1. Wytłaczanie 146
3.1.1. Wytłaczanie konwencjonalne 146
3.1.2. Wytłaczanie autotermiczne 159
3.1.3. Wytłaczanie tłokowe 161
3.1.4. Wytłaczanie porujące 164
3.1.5. Wytłaczanie powlekające 166
3.1.6. Współwytłaczanie 169
3.1.7. Wytłaczanie dwuślimakowe 177
3.2. Wtryskiwanie 183
3.2.1. Wtryskiwanie konwencjonalne 183
3.2.2. Wtryskiwanie dokładnościowe 193
3.2.3. Układ narzędziowy 204
3.2.4. Wtryskiwanie tworzyw utwardzalnych 211
3.2.5. Wtryskiwanie elastomerów utwardzalnych 214
3.2.6. Wtryskiwanie wieloskładnikowe 216
3.2.7. Wtryskiwanie porujące 223
3.2.8. Wtryskiwanie wysokotemperaturowe 227
3.3. Prasowanie 228
3.3.1. Prasowanie wstępne (tabletkowanie) 229
3.3.2. Prasowanie wysokociśnieniowe 230
3.3.3. Prasowanie niskociśnieniowe 239
3.4. Laminowanie 241
3.4.1. Laminowanie natryskowe i przeciąganie 242
3.4.2. Nawijanie 245
3.4.3. Nakładanie 249
3.5. Odlewanie 250
3.5.1. Odlewanie normalne 251
3.5.2. Odlewanie rotacyjne 257
3.5.3. Wylewanie i zalewanie 259
3.6. Kalandrowanie 263
3.6.1. Charakterystyka ogólna 263
3.6.2. Kalandrowność 267
3.7. Mieszanie 272
3.7.1. Charakterystyka ogólna 273
3.7.2. Mieszanie mechaniczne 275
3.7.3. Mieszanie mechaniczno-cieplne 280
3.8. Przędzenie 285
Literatura 293

Rozdział 4. Metody przetwórstwa chemiczno-fizycznego 300

4.1. Formowanie polimeryzacyjne 300
4.1.1. Formowanie polimeryzacyjne PUR 300
4.1.2. Formowanie polimeryzacyjne PA 306
4.1.3. Formowanie polimeryzacyjne PMMA 310
4.2. Nanoszenie 311
4.2.1. Nanoszenie fluidyzacyjne 312
4.2.2. Nanoszenie elektrocieplne 315
4.2.3. Nanoszenie płomieniowe 319
4.2.4. Nanoszenie polewające 321
4.2.5. Nanoszenie natryskowe 323
4.2.6. Nanoszenie zanurzeniowe 326
4.3. Klejenie i kitowanie 329
4.3.1. Podstawy procesów klejenia i kitowania 329
4.3.2. Technologia klejenia i kitowania 336
4.4. Zamszowanie 340
4.5. Drukowanie 341
4.5.1. Podstawy procesu drukowania 341
4.5.2. Technologia drukowania 344
4.6. Metalizowanie 349
4.6.1. Metalizowanie folią 350
4.6.2. Metalizowanie natryskowe i zanurzeniowe 350
4.6.3. Metalizowanie próżniowe 352
4.6.4. Metalizowanie elektrochemiczne 356
4.7. Ulepszanie chemiczne 360
Literatura 365

Rozdział 5. Technologia i organizacja przetwórstwa 369

5.1. Wprowadzenie 369
5.2. Dokładność wytworów 369
5.2.1. Skurcz — warunki przetwórstwa — wymiary 369
5.2.2. Tolerancje wymiaru 376
5.2.3. Układ tolerancji i odchyłek 382
5.2.4. Zapobieganie powstawaniu anomalii 386
5.2.5. Przykłady obliczeniowe 390
5.3. Warunki przetwórstwa 392
5.3.1. Podstawy doboru optymalnych warunków przetwórstwa 393
5.3.2. Warunki spajania, porowania i suszenia 395
5.3.3. Warunki wytłaczania 398
5.3.4. Warunki wtryskiwania 405
5.3.5. Warunki prasowania 412
5.4. Zagadnienia ogólne procesów technologicznych 415
5.5. Procesy technologiczne PFC II 416
5.5.1. Wytłaczanie kształtowników, płyt i folii 417
5.5.2. Wytłaczanie z rozdmuchiwaniem swobodnym 427
5.5.3. Wytłaczanie z rozdmuchiwaniem w formie 432
5.5.4. Wytłaczanie z granulowaniem 438
5.5.5. Wytłaczanie z wulkanizowaniem 442
5.5.6. Wtryskiwanie wyprasek technicznych i precyzyjnych 444
5.5.7. Wtryskiwanie z rozdmuchiwaniem 451

5.5.8. Wtryskiwanie z wytłaczaniem 456
5.5.9. Proces technologiczny prasowania 458
5.5.10. Proces technologiczny laminowania 461
5.5.11. Proces technologiczny kalandrowania 467
5.5.12. Proces technologiczny mieszania 471
5.6. Procesy technologiczne PFC I i PCF 472
5.6.1. Proces technologiczny zgrzewania 473
5.6.2. Proces technologiczny ulepszania radiacyjnego 478
5.6.3. Proces technologiczny formowania PUR 479
5.6.4. Proces technologiczny nanoszenia 483
5.7. Projektowanie procesów technologicznych 485
5.7.1. Technologiczność konstrukcji wytworu 486
5.7.2. Podstawy wyboru metody i odmiany przetwórstwa 497
5.7.3. Podstawy wyboru linii i stanowiska 500
5.7.4. Dokumentacja technologiczna 504
5.7.5. Przykłady obliczeniowe 507
5.8. Organizacja linii i stanowisk 510
5.8.1. Podstawy organizacji 510
5.8.2. Rozwiązania organizacyjne 512
Literatura 517

Skorowidz **521**

PRZEDMOWA

Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych ma bardzo bogatą literaturę obcojęzyczną i skromniejszą literaturę w języku polskim. Przy opracowywaniu książki konieczna więc była — zawsze związana z pewnym ryzykiem — ocena i selekcja wiadomości oraz konsekwentne stosowanie podejścia systematycznego i syntetycznego. W przetwórstwie istnieje jednak nadal wiele niejasności, ale technika związana z nim jest już bardzo zaawansowana i rozwinięta. Praktyka wyprzedziła tu teorię, co znajduje potwierdzenie w analizie planów i programów nauczania większości uczelni technicznych. Sytuacja taka sprawia specyficzne trudności i niewątpliwie powoduje pewne niedociągnięcia.

Przyjęto założenie, że Czytelnik posiada elementarne wiadomości o otrzymywaniu, modyfikacji, właściwościach i strukturze tworzyw oraz zna w zarysie podstawy przetwórstwa. Ograniczona objętość książki nie pozwala na wyczerpujące omówienie wszystkich poruszonych problemów. Zrozumiałe staje się więc, że w niektórych fragmentach, na przykład dotyczących szkiców i opisów współdziałania elementów składowych maszyn, narzędzi i urządzeń przetwórczych, podano tylko zasady, szczegóły pozostawiając do rozwiązania Czytelnikowi. Nie interpretowano szczegółowo danych liczbowych wielu tablic i przebiegu niektórych wykresów oraz nie przedstawiano pewnych specyficznych zagadnień, często odsyłając Czytelnika do konkretnych publikacji.

W literaturze istnieje duża niejednorodność, a nawet dowolność stosowanych klasyfikacji, pojęć i terminów. W książce starano się stosować ład pojęciowy i klasyfikacje oparte na podstawach naukowych i spójności interdyscyplinarnej, z uszanowaniem w możliwie największym stopniu dotychczasowego dorobku, tradycji i przyzwyczajeń. W przypadku, gdy w literaturze jest używany do tego samego celu, równoprawnie, więcej niż jeden termin, podawano nomenklaturę stosowaną najczęściej. Pomimo opóźnień, ciągle jeszcze małej produkcji i niedostatecznego wykorzystania tworzyw oraz różnych wahań w kierunkach rozwoju, koordynacji i finansowania prac naukowych i technicznych, w Polsce wniesiono istotny wkład (w niektórych dziedzinach) w rozwój przetwórstwa, świadectwem czego jest stan literatury krajowej. Chcąc zweryfikować tę tezę, książkę oparto w dużym stopniu na szeroko rozumianej literaturze polskiej (książki, publikacje

w czasopismach, rozprawy doktorskie i habilitacyjne, patenty, dostępne prace nie publikowane), oczywiście w ścisłym powiązaniu z literaturą obcojęzyczną, zwłaszcza w języku angielskim i niemieckim.

Składam serdeczne podziękowanie tym wszystkim osobom i instytucjom, które współpracowały ze mną na różnych etapach opracowywania książki. Moje podziękowania kieruję zwłaszcza do Kolegów z Katedry Przetwórstwa Tworzyw Wielkocząsteczkowych Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej oraz Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Maszyn i Urządzeń Chemicznych „Metalchem" w Toruniu.

Czerwiec 1991 r.

Robert Sikora

Rozdział 1

PODSTAWY PROCESU UPLASTYCZNIANIA

1.1. Znaczenie i metody uplastyczniania

Do najważniejszych zagadnień w przetwórstwie tworzyw wielkocząsteczkowych należy *uplastycznianie* tworzywa przetwarzanego, tj. odpowiednie przejście tworzywa wejściowego, na skutek nagrzewania i ruchu, ze stanu na ogół stałego w stan plastyczny lub plastyczny i następnie ciekły. Proces uplastyczniania jest podstawowym czynnikiem determinującym wydajność przetwórstwa. Tworzywo wyjściowe w stanie plastycznym lub ciekłym musi charakteryzować się określonymi parametrami, a więc temperaturą, ciśnieniem, stopniem homogenizacji, prędkością ruchu i natężeniem przepływu. Ma to szczególne znaczenie w metodach przetwórstwa o dominującej roli — wytłaczaniu i wtryskiwaniu. Należy odróżnić proces uplastyczniania od procesu *plastyfikowania*. Proces uplastyczniania zachodzi na skutek nagrzewania i ruchu tworzywa, natomiast proces plastyfikowania — tylko dzięki działaniu środka pomocniczego — *plastyfikatora* (zmiękczacza) wprowadzonego do tworzywa.

Proces uplastyczniania, w którym tworzywo uzyskuje ściśle określone wymienione parametry, odbywa się w układach uplastyczniających (uplastyczniania) maszyn przetwórczych, przede wszystkim maszyn o podstawowym znaczeniu, czyli wtryskarek i wytłaczarek. Trzeba dodać, że oprócz układu uplastyczniającego w skład wtryskarki wchodzi jeszcze układ narzędzia i układ napędowy, a w skład wytłaczarki — tylko układ napędowy (patrz rozdz. 3).

Układ uplastyczniający wtryskarki i wytłaczarki spełnia następujące funkcje:

a) *nagrzewanie*, które prowadzi do zapewnienia zadanego przebiegu zmian stanów fizycznych tworzywa przetwarzanego, określanego temperaturą i jej fluktuacją;

b) *sprężanie*, mające na celu wytworzenie w tworzywie przetwarzanym zadanego przebiegu zmian ciśnienia, określanego wartością ciśnienia i jego pulsacją;

c) *mieszanie*, prowadzone w celu homogenizowania, czyli ujednorodnienia składu i właściwości, głównie cieplnych oraz mechanicznych, jak również ujednorodnienia struktury tworzywa przetwarzanego;

d) *transportowanie*, tj. przemieszczanie tworzywa przez układ z uzyskaniem na jego końcu potrzebnej prędkości wypływu tworzywa z określonym natężeniem i ustaloną fluktuacją oraz pulsacją.

Liczba funkcji układu uplastyczniającego oraz zmienność intensywności ich występowania, również w różnych miejscach danego układu, powoduje, że możliwych jest wiele rozwiązań konstrukcyjnych tego układu. Układy uplastyczniające dzieli się ogólnie następująco:

— *układ ślimakowy*, który może być jedno- lub wieloślimakowy,

— *układ bezślimakowy*, który może być głównie tłokowy, tarczowy, pierścieniowy, wirnikowy i planetarny,

— *układ mieszany*, np. ślimakowo-tłokowy lub ślimakowo-tarczowy.

Uplastycznianie za pomocą układu ślimakowego nazywa się uplastycznianiem ślimakowym, za pomocą układu tłokowego — uplastycznianiem tłokowym itp.

Tworzywo w układzie uplastyczniającym nagrzewać się może na skutek ciepła doprowadzanego z grzejników $\dot{Q}_G$ lub wytworzonego dzięki tarciu zewnętrznemu $\dot{Q}_Z$ i wewnętrznemu $\dot{Q}_W$ tworzywa. Zatem całkowity strumień ciepła $\dot{Q}_C$ działający na tworzywo, w ujęciu ogólnym, równa się

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_G + \dot{Q}_Z + \dot{Q}_W \tag{1.1}$$

W części układu uplastyczniającego, w której tworzywo jest w stanie plastycznym lub ciekłym, $\dot{Q}_Z = 0$ i zależność (1.1) ma postać

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_G + \dot{Q}_W \tag{1.2}$$

Przemianę tworzywa zachodzącą w układzie uplastyczniającym, podczas której spełnione są zależności (1.1) i (1.2), przyjęto w literaturze nazywać, aczkolwiek niezbyt ściśle, *przemianą politropową**.

Jeżeli $\dot{Q}_G = 0$, zależność (1.1) przybiera postać

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_Z + \dot{Q}_W \tag{1.3}$$

a w odniesieniu do wymienionej części układu uplastyczniającego

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_W \tag{1.4}$$

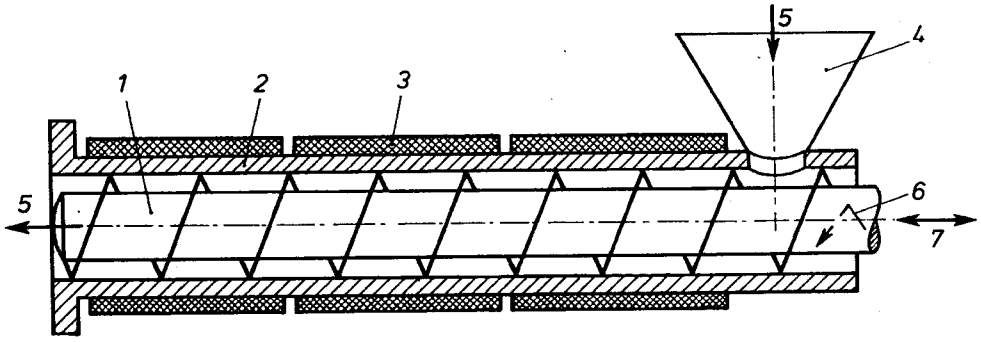
Przemianę tworzywa, w czasie której zachodzą zależności (1.3) i (1.4), nazywa się *przemianą autotermiczną* lub też przemianą *autogeniczną*, bądź nieściśle — *adiabatyczną*.

Trzeba jeszcze wspomnieć o uplastycznianiu za pomocą układu pompowego, którego istotą jest oddzielenie funkcji nagrzewania od pozostałych funkcji. Nagrzewanie prowadzi się w osobnym urządzeniu i tworzywo w stanie plastycznym lub ciekłym jest poddawane sprężaniu i transportowaniu, a także w mniejszym stopniu homogenizowaniu, przy użyciu pompy zębatej. Jeżeli tworzywo pompowane jest w stanie ciekłym, to układ pompowy stanowi część przędzarki (rozdz. 3, p. 3.8) (rozwiązanie stosowane od dziesięcioleci), jeżeli natomiast tworzywo znajduje się w stanie plastycznym, to układ pompowy jest częścią wytłaczarki. Wytłaczanie z użyciem pompy zębatej jest stosowane od niedawna [1.11].

* Przemiana politropowa jest to przemiana, podczas której ciepło właściwe nie ulega zmianie, co nie jest spełnione w procesie uplastyczniania.

1.2. Ślimak — cylinder

Podstawowe znaczenie ma obecnie uplastycznianie ślimakowe. Typowy układ uplastyczniający ślimakowy w procesie wytłaczania i wtryskiwania składa się z: zespołu mechanicznego, który tworzą cylinder z końcówką lub bez niej i obracający się ślimak (lub kilka ślimaków) umieszczony w cylindrze, zespołu nagrzewająco-ochładzającego, który tworzą urządzenia elektrotermiczne, zwane krótko grzejnikami lub nagrzewnicami, urządzenia sterująco-regulujące i ewentualnie wentylatory, oraz z urządzeń pomocniczych, np. z zaworów odgazowujących. Grzejniki, nagrzewnice i wentylatory umieszczone są na cylindrze, a urządzenia sterująco-regulujące znajdują się na ogół w oddzielnej szafie. W procesie wytłaczania ślimak wykonuje tylko ruch obrotowy, natomiast w procesie wtryskiwania — ruch obrotowy i liniowy postępowo-zwrotny. Z jednej strony układu ślimakowego jest umiejscowiony



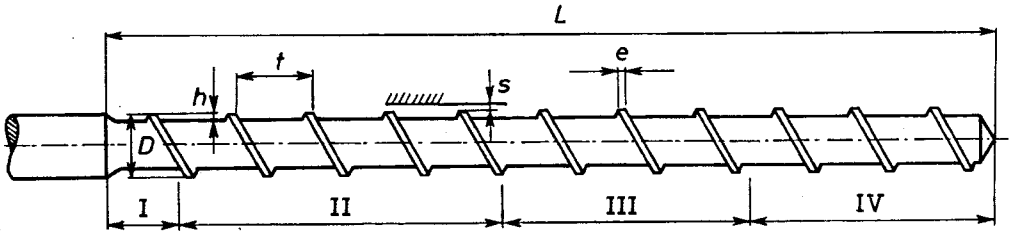
Rys. 1.1. Schemat typowego układu uplastyczniającego ślimakowego: *1* — ślimak, *2* — cylinder, *3* — grzejniki, *4* — zasobnik tworzywa, *5* — ruch finalny tworzywa przetwarzanego, *6* — ruch obrotowy ślimaka, *7* — ruch liniowy postępowo-zwrotny ślimaka

układ napędowy ślimaka lub ślimaków, z drugiej znajduje się narzędzie, z trzeciej — zasobnik tworzywa. Tworzywo przetwarzane wprowadza się do układu ślimakowego z zasobnika, a odprowadza z niego do narzędzia — w przypadku wytłaczania, w stanie plastycznym, do głowicy wytłaczarskiej, natomiast w przypadku wtryskiwania, w stanie ciekłym, do formy wtryskowej. Na rysunku 1.1 przedstawiono schemat omawianego układu ślimakowego.

1.2.1. Ślimaki w układzie jednoślimakowym

W celu zapewnienia poprawnego przebiegu procesów w układzie jednoślimakowym, klasyczny ślimak jest podzielony umownie na następujące podstawowe strefy: zasypu I, zasilania II, przemiany (sprężania) III i dozowania IV (rys. 1.2). *Strefę zasypu*, o długości $(1{,}5 \div 2)D$ (D — średnica zewnętrzna ślimaka) tworzy część ślimaka znajdująca się bezpośrednio pod otworem wysypowym zasobnika tworzywa. W strefie tej następuje przyjęcie przez ślimak tworzywa wejściowego, na ogół w kształcie granulek lub proszku, poprzez możliwie całkowite wypełnienie tworzywem obszaru między zwojami ślimaka, zwanego *kanałem śrubowym ślimaka*. Strefa ta nie zawsze jest wydzielana i bywa łączona ze strefą zasilania. Następna strefa, *strefa zasilania*, o długości na ogół $(4 \div 15)D$, rozpoczyna się w miejscu zamkniętym na całym

obwodzie cylindra. Tworzywo w tej strefie ma taką samą postać i kształt, jak w strefie zasypu, ale ulega głównie nagrzewaniu, sprężaniu i transportowi, w wyniku czego w tworzywie zachodzą przemiany. W części poprzecznego przekroju kanału ślimaka



Rys. 1.2. Elementy geometryczne ślimaka klasycznego: I — strefa zasypu, II — strefa zasilania, III — strefa przemiany, IV — strefa dozowania, L — długość części roboczej, D — średnica zewnętrzna, h — głębokość kanału, t — skok linii śrubowej zwoju kanału, e — szerokość zwoju, s — grubość szczeliny (luz), tj. odległość pomiędzy powierzchnią zewnętrzną zwoju a powierzchnią wewnętrzną cylindra

tworzywo przechodzi w stan plastyczny — zaczyna się w tym miejscu kolejna strefa ślimaka, *strefa przemiany*. Strefa ta ma długość na ogół $(5 \div 10)D$. W miarę transportowania tworzywa przez tę strefę, udział tworzywa w stanie plastycznym rośnie i może zacząć pojawiać się tworzywo w stanie ciekłym, którego udział również rośnie. W momencie, gdy w całym przekroju poprzecznym kanału tworzywo jest w stanie plastycznym lub ciekłym, rozpoczyna się *strefa dozowania*. Tak więc w strefie przemiany układ spełnia wszystkie swe funkcje w przybliżeniu z jednakową intensywnością. Zadaniem strefy dozowania, mającej na ogół długość porównywalną z długością strefy przemiany, jest przede wszystkim ostateczne przeprowadzenie w stan plastyczny, lub dalej ciekły, resztek tworzywa, które mogły tego stanu nie osiągnąć poprzednio, dalsza homogenizacja oraz nadanie i ustabilizowanie parametrów tworzywa opuszczającego układ. Strefy II, III i IV przechodzą jedna w drugą w sposób ciągły często ze słabo zaznaczonymi granicami.

Ślimak jest charakteryzowany głównie następującymi elementami geometrycznymi (rys. 1.2):

— *stosunkiem długości części roboczej do średnicy zewnętrznej* L/D; wartość ta zawiera się w granicach $3 \div 35$ (tabl. 1.1),

— *głębokością h kanału;* wynosi ona na ogół $(0{,}05 \div 0{,}3)D$ i jest największa w strefie zasypu, a najmniejsza na końcu strefy dozowania,

— *skokiem t linii śrubowej zwoju;* ma on najczęściej wartość $(0{,}8 \div 1{,}2)D$,

— *stromością* γ_s *linii śrubowej zwoju* (rys. 1.3)

$$\gamma_s = \frac{t}{\pi D_s} = \operatorname{tg} \alpha_s \tag{1.5}$$

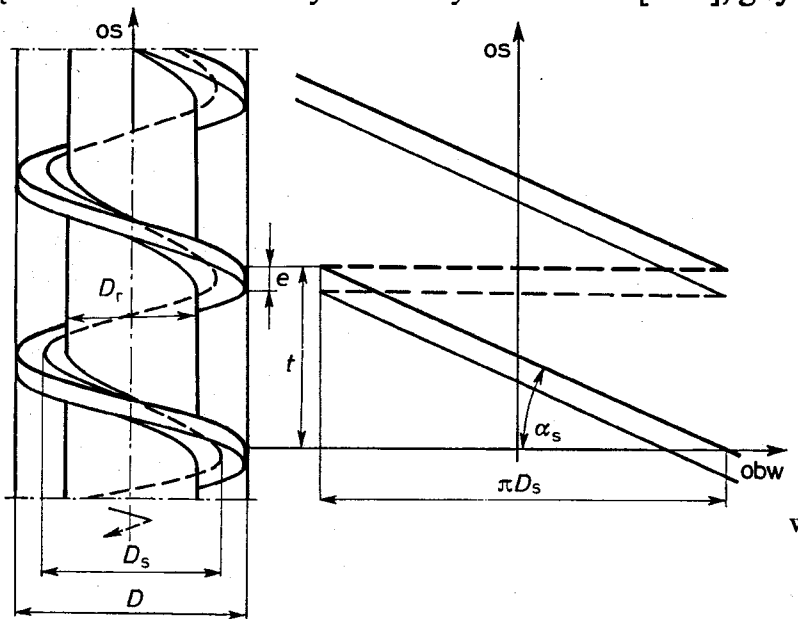
gdzie $D_s = (D + D_r)/2$, α_s — kąt pochylenia linii śrubowej,

— *szerokością e grzbietu zwoju;* na ogół $e = (0{,}06 \div 0{,}1)D$,

— *krotnością i zwojów;* zazwyczaj krotność zwojów wynosi jeden, ale spotyka się ślimaki wielozwojowe, np. dwuzwojowe,

— *redukcją objętości kanału,* zwaną dawniej stopniem sprężania, definiowaną jako stosunek objętości zwojów; redukcja całkowita jest stosunkiem objętości zwoju na początku strefy zasilania do odpowiadającej objętości zwoju na końcu strefy

dozowania; redukcja całkowita wynosi na ogół 1,3÷5 dla tworzyw termoplastycznych i 1,0÷1,5 dla tworzyw utwardzalnych. Nie można jej definiować jako stosunek głębokości kanału w wymienionych strefach [1.78], gdyż znane są ślimaki o h = const.



Rys. 1.3. Rysunek pomocniczy do wyznaczenia zależności (1.5)

Tablica 1.1

Stosunek długości L części roboczej do średnicy zewnętrznej D ślimaka

Układy ślimakowe	Stosunek L/D
Wytłaczarki jednoślimakowe	
do gumy z nagrzaniem wstępnym	3÷6
do gumy bez nagrzania wstępnego	10÷20
autotermiczne	12÷18
ogólnego zastosowania	20÷30
do wytłaczania z rozdmuchiwaniem	30÷35
Wytłaczarki dwuślimakowe	
stożkowe	12÷18*
walcowe	16÷22
Wtryskarki liniowe	
do gumy	12÷15
do tworzyw utwardzalnych (bez gumy)	10÷14
do tworzyw termoplastycznych	18÷22

* Dotyczy średnicy średniej D_i; $D_i = (D_{max} + D_{min})/2$.

Również dyskusyjne jest jej definiowanie jako stosunek pól przekrojów poprzecznych kanału [1.29], nie uwzględnia się bowiem długości kanału związanej ze stromością,

— *otworem wzdłużnym* o średnicy zazwyczaj (0,25÷0,35) D do chłodzenia sprężonym powietrzem lub wodą pod ciśnieniem (tylko w niektórych ślimakach).

Ściśle określone wartości wymienionych elementów charakteryzujących ślimak dobiera się w zależności od metody i odmiany przetwórstwa, właściwości fizycznych tworzyw przetwarzanych oraz żądanych właściwości wytworów. W strefie przemiany

jest też niekiedy usytuowana miejscowa deredukcja objętości kanału (redukcja mniejsza od jedności), w celu umożliwienia odgazowania tworzywa.

Potrzebną redukcję objętości kanału można w ślimaku walcowym osiągnąć poprzez odpowiednie zmniejszenie skoku linii śrubowej zwoju od strefy zasilania do strefy dozowania bądź dzięki zmniejszającej się w tym samym kierunku głębokości kanału, wreszcie wskutek jednego i drugiego jednocześnie. Ze względu na zjawiska fizyczne zachodzące w układzie [1.15] oraz z uwagi na prostsze wykonanie ślimaka, znacznie częściej stosuje się ślimak o stałym skoku i zmiennej głębokości kanału.

Konstrukcja ślimaka musi zapewniać, dla zachowania ciągłości procesów zachodzących w układzie ślimakowym, natężenie przepływu tworzywa w strefach zasilania i przemiany równe natężeniu w strefie dozowania lub nieco większe. Natężenie przepływu w układzie jest określane natężeniem przepływu w strefie dozowania. Ponieważ w tej strefie tworzywo jest w stanie plastycznym lub ciekłym

Tablica 1.2

Prędkość obwodowa ślimaka (największa)

Układy ślimakowe		Prędkość obwodowa, m/s
Wytłaczarki jednoślimakowe		
do tworzyw niestabilnych cieplnie		0,3
do tworzyw stabilnych cieplnie		0,5÷0,8
autotermiczne		0,8÷1,5
Wytłaczarki dwuślimakowe		
stożkowe		0,15÷0,25
walcowe		0,2÷0,35
Wtryskarki liniowe		
do tworzyw utwardzalnych		0,3÷0,6
do tworzyw niestabilnych cieplnie	termoplastycznych	0,5÷1,2
do tworzyw stabilnych cieplnie	termoplastycznych	0,7÷1,4

można przyjąć, że pracuje ona jak pompa śrubowa, pompująca płyn na ogó nieniutonowski.

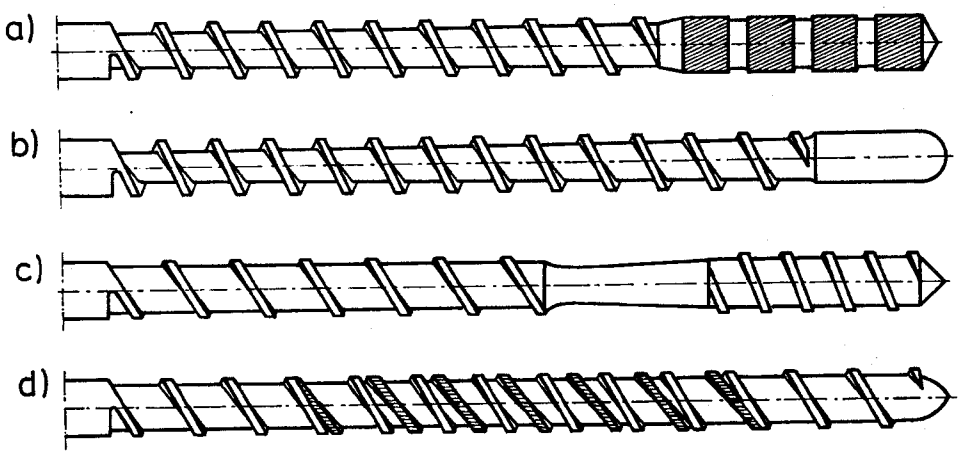
Prędkość obwodowa ślimaka jest bardzo różna, na ogół zawiera się w granicach c ułamka do półtora metra na sekundę (tabl. 1.2).

Ślimaki z układów jednoślimakowych dzieli się ogólnie na ślimaki klasyczn niekonwencjonalne i specjalne.

Ślimaki klasyczne mają kanał ciągły wzdłuż całej długości części roboczej or redukcję miejscową i całkowitą równą jedności lub większą. Różnią się między sol elementami geometrycznymi. Stosowane są coraz rzadziej, gdyż na ogół nie zapewnia zadowalającej efektywności procesów zachodzących w układzie uplastyczniającym.

Ślimaki niekonwencjonalne charakteryzują się tym, że na długości części robocz zawierają odcinki kanału, na przykład:

— nieśrubowego nieciągłego, będącego zakończeniem strefy dozowania (rys. 1.4
— nieśrubowego ciągłego, stanowiącego zakończenie strefy dozowania (rys. 1.4



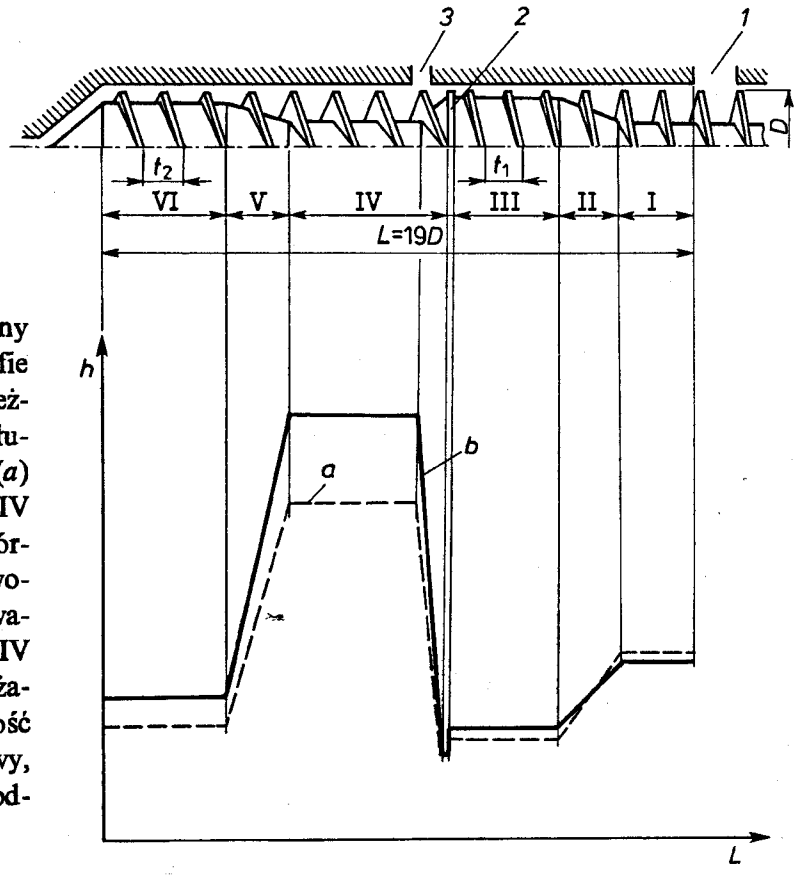
Rys. 1.4. Niektóre ślimaki niekonwencjonalne: a) z końcówką użebrowaną, b) z końcówką gładką, c) z deredukcją w kanale nieśrubowym ciągłym w strefie przemiany, d) ślimak Maillefera

— nieśrubowego ciągłego w strefie przemiany, gdzie występuje miejscowa deredukcja objętości kanału (rys. 1.4c),

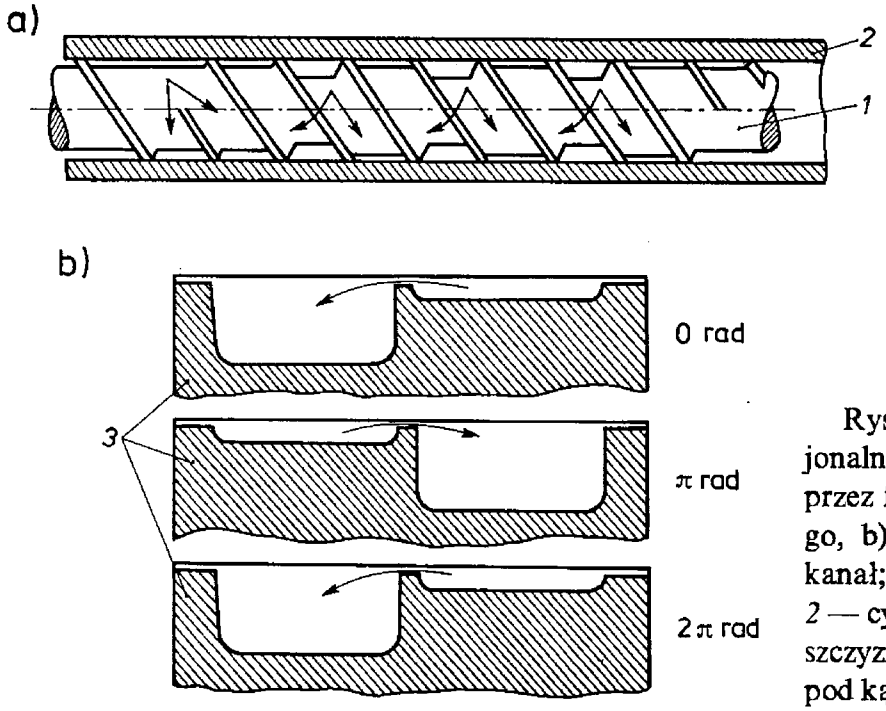
— śrubowego, ze swojem śrubowym zaporowym w strefie przemiany: ślimak Maillefera (rys. 1.4d), ślimak Geyera, ślimak Barra, ślimak Draya, ślimak Kima [1.7, 1.87],

— śrubowego z deredukcją objętości kanału [1.43] i zwojem zaporowym poprzecznym (rys. 1.5),

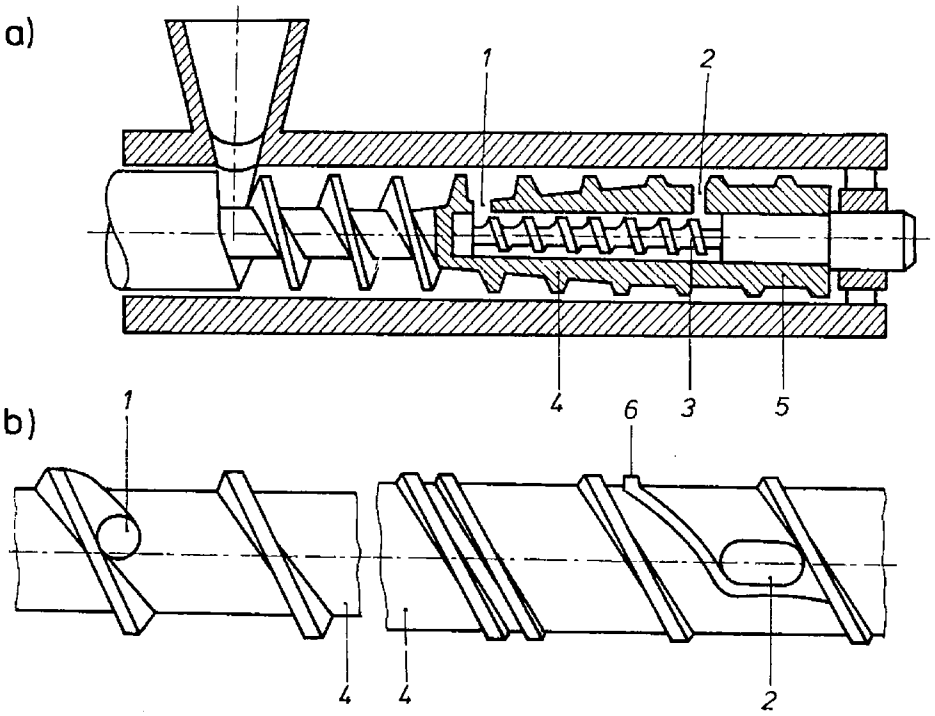
— z kanałami separacyjnymi i nawrotem tworzywa (rys. 1.6).



Rys. 1.5. Ślimak niekonwencjonalny z deredukcją w kanale ciągłym w strefie przemiany: a) schemat, b) wykres zależności głębokości h kanału od jego długości L w przypadku dużej lepkości (a) oraz małej lepkości (b) tworzywa; I, IV — strefy zasilania pierwotnego i wtórnego, II, V — strefy przemiany pierwotnej i wtórnej, III, VI — strefy dozowania pierwotnego i wtórnego, strefa IV jest również strefą, gdzie na przeważającej długości występuje stała wartość deredukcji, *1* — otwór zasypowy, *2* — zwój zaporowy, *3* — otwór odgazowujący w cylindrze [1.78, 1.80]



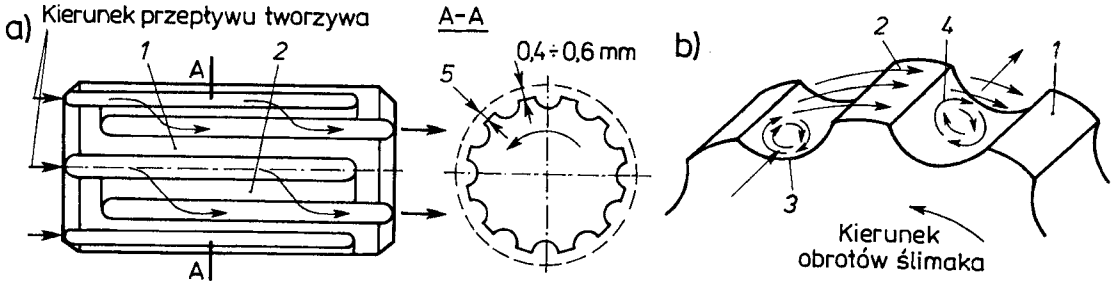
Rys. 1.6a. Ślimak niekonwencjonalny HPM: a) przekrój wzdłużny przez fragment układu ślimakowego, b) przekrój poprzeczny przez kanał; *1* — ślimak dwuzwojowy, *2* — cylinder, *3* — przekroje w płaszczyznach nachylonych umownie pod kątem 0, π oraz 2π rad — strzałki wskazują przepływ tworzywa uplastycznionego [1.56, 1.63, 1.87]



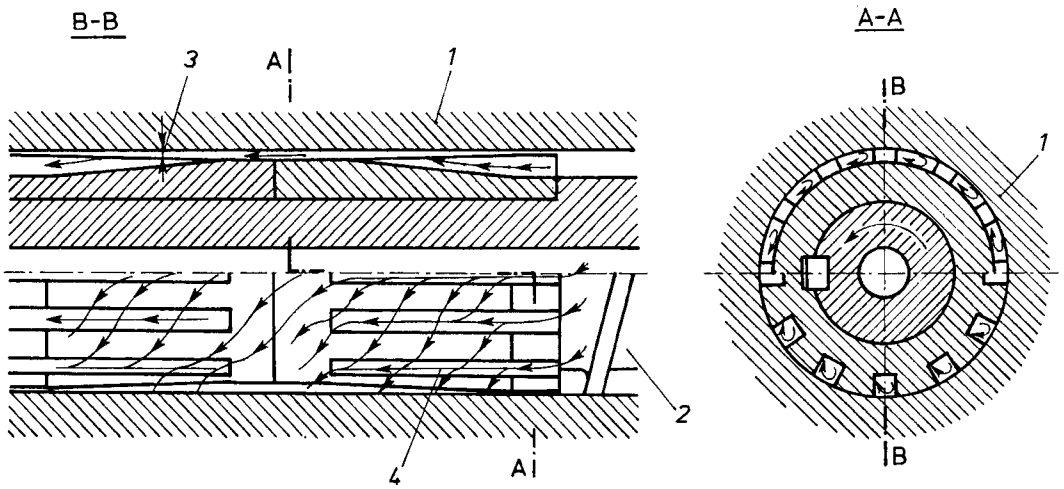
Rys. 1.6b. Ślimak niekonwencjonalny SDS: a) przekrój wzdłużny przez układ ślimakowy, b) widok fragmentu ślimaka zewnętrznego; *1* — otwór wylotowy do tworzywa uplastycznionego kanału separacyjnego, *2* — otwór wlotowy do tworzywa nie uplastycznionego kanału separacyjnego, *3* — ślimak wewnętrzny stacjonarny, *4* — ślimak zewnętrzny główny, *5* — strefa dozowania, *6* — zwój zgarniający tworzywo nie uplastycznione [1.34, 1.87]

Ślimaki specjalne są zaopatrzone w specjalnej konstrukcji elementy intensyfikujące ścinanie i mieszanie tworzywa w układzie jednoślimakowym. Chociaż oba procesy występują jednocześnie, można podzielić je na elementy, w których przeważa proces ścinania, i na elementy, w których dominuje proces mieszania. Elementy o przewadze procesu ścinania, zwane umownie *elementami intensywnego ścinania*, charakteryzują

się szczelinami, przez które przepływa tworzywo ruchem zbliżonym do liniowego i ulega intensywnemu ścinaniu. Umieszcza się je w strefie przemiany, np. w ślimaku o $L/D = 20 \div 25$ są umieszczane w odległości $(3 \div 7)\,D$ od jego końcówki, ewentualnie elementy stanowią zakończenie ślimaka [1.85, 1.87]. Obecnie znanych jest bardzo dużo rozwiązań elementów intensywnego ścinania, ale pierwszym z nich [1.74] był pierścień Maddocka z 1967 r. (rys. 1.7). Przykład nowoczesnego rozwiązania



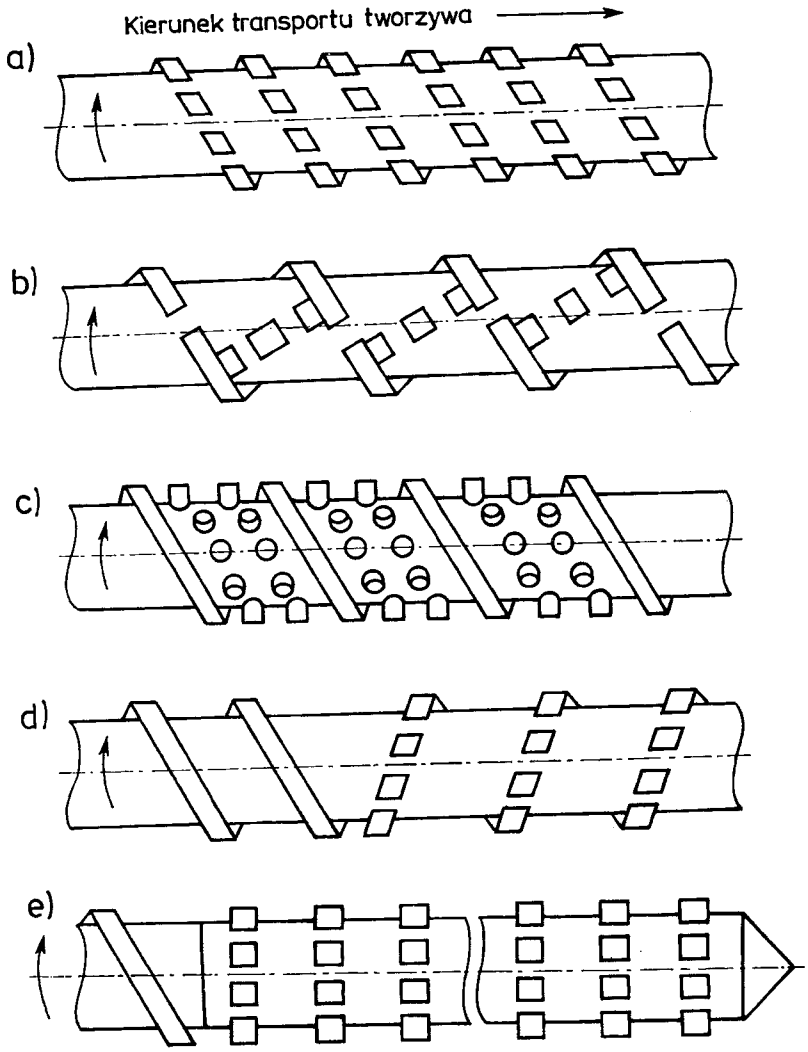
Rys. 1.7. Schemat: a) budowy pierścienia Maddocka, b) przepływu tworzywa w pierścieniu; *1* — przegroda zbierająca, *2* — przegroda ścinająca, *3* — rowek mieszający wlotowy, *4* — rowek mieszający wylotowy, *5* — odległość pomiędzy powierzchnią przegrody zbierającej a powierzchnią wewnętrzną cylindra, równa luzowi ślimaka w cylindrze; strzałki wskazują kierunek przepływu tworzywa [1.48, 1.52]



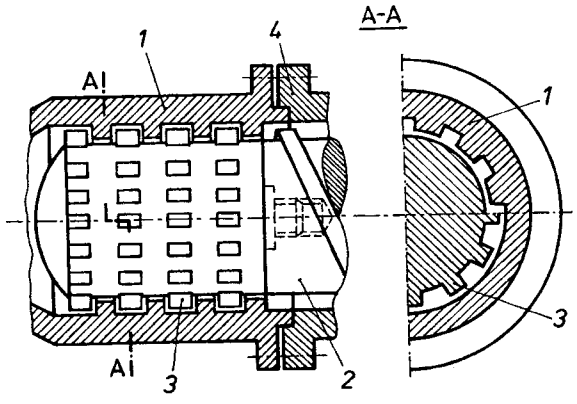
Rys. 1.8. Przykład rozwiązania elementów intensywnego ścinania i ich umieszczenia w ślimaku: *1* — cylinder, *2* — ślimak, *3* — szczeliny ścinające o zmiennej wysokości, *4* — kanały przepływowe tworzywa; strzałki wskazują kierunek przepływu tworzywa [1.60, 1.85]

przedstawiono na rys. 1.8. Elementy o przewadze procesu mieszania, zwane umownie *elementami intensywnego mieszania*, charakteryzują się z kolei obszarami, gdzie strumień przepływającego tworzywa ulega wielokrotnemu podziałowi i łączeniu z dużym udziałem ruchu obrotowego (zawirowań), co powoduje intensywne mieszanie tworzywa. Na rysunku 1.9 pokazano kilka rozwiązań elementów intensywnego mieszania. Omawiane elementy mogą być również jednocześnie rozmieszczone na ślimaku i w cylindrze, co jest pokazane na rys. 1.10. Jedno z nowoczesnych rozwiązań konstrukcyjnych ślimaka do PE-LD z elementami intensywnego ścinania i mieszania J. Staśka [1.84] przedstawiono na rys. 1.11.

Ślimaki niekonwencjonalne i specjalne zapewniają w różnym stopniu intensyfikację nagrzewania, sprężania i mieszania, przy na ogół nie zmienionym lub pogorszonym



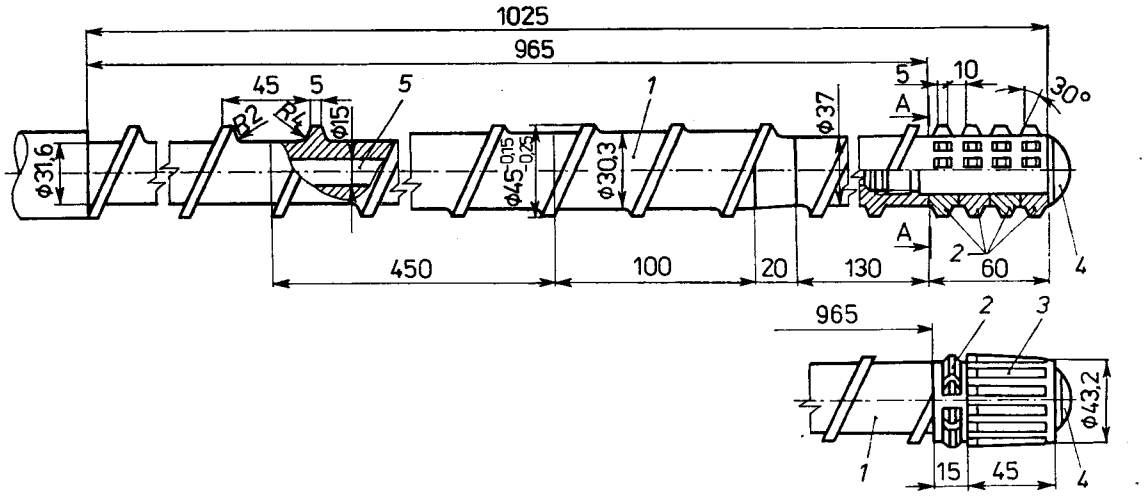
Rys. 1.9. Niektóre rozwiązania elementów intensywnego mieszania: a) ślimak z przeciętymi zwojami, b) ślimak z przeciętymi zwojami i elementami zaporowymi, c) ślimak z kołkami w kanale, d) ślimak ze zwojami przeciwbieżnymi przeciętymi, e) ślimak z końcówką mającą przecięte zwoje poprzeczne [1.87, 1.89]



Rys. 1.10. Elementy intensywnego mieszania w kształcie występów prostokątnych mocowanych na końcówce ślimaka i końcówce cylindra: *1* — końcówka cylindra, *2* — ślimak, *3* — kołki prostokątne, *4* — cylinder

transportowaniu, gdyż odstępstwa od kanału śrubowego są czynnikiem dławiącym przepływ wypadkowy w kanale. Występuje to także w ślimakach z innych układów.

Duża liczba różnych rozwiązań konstrukcyjnych ślimaków, z których kilkaset jest opatentowanych, świadczy o złożoności problematyki, ale również o niedostatkach teorii konstrukcji ślimaków i podstaw ich projektowania, co dotyczy w jeszcze



Rys. 1.11. Rozwiązanie konstrukcyjne nowoczesnego ślimaka przeznaczonego do wytłaczania PE-LD: *1* — część robocza o kanale ciągłym, *2* — element intensywnego mieszania, *3* — element intensywnego ścinania, *4* — końcówka ślimaka, *5* — otwór do chłodzenia ślimaka sprężonym powietrzem

większym stopniu ślimaków z innych układów. Kryteria oceny ślimaków są złożone [1.37] i praktycznie trudno jest wskazać ślimak najbardziej właściwy do danego zastosowania. Należy zauważyć, że producenci wtryskarek i wytłaczarek często oferują ślimaki określane jako uniwersalne [1.39], czyli nadające się do większości tworzyw termoplastycznych, z wyjątkiem PVC, i niektórych tworzyw utwardzalnych, co, jak się wydaje, ma głównie znaczenie handlowe.

Ślimaki do wszystkich układów wykonuje się zazwyczaj ze stali konstrukcyjnych do azotowania 38HMJ lub ze stali do hartowania płomieniowego 40HM. W celu nadania ślimakom żądanej trwałości poddaje się je azotowaniu, zwłaszcza jonowemu, ale stosuje się również inne metody obróbki cieplnej bądź cieplno-chemicznej, jak również napawanie zwojów stopami metali odpornych na zużycie tribologiczne [1.38, 1.76, 1.81, 1.86].

1.2.2. Ślimaki w układzie dwuślimakowym

Układy uplastyczniające dwuślimakowe, o ślimakach jednakowej długości, dzieli się ze względu na kierunek obrotu ślimaków na (rys. 1.12):

— współbieżne; ślimaki wykonują ruch obrotowy zgodny,

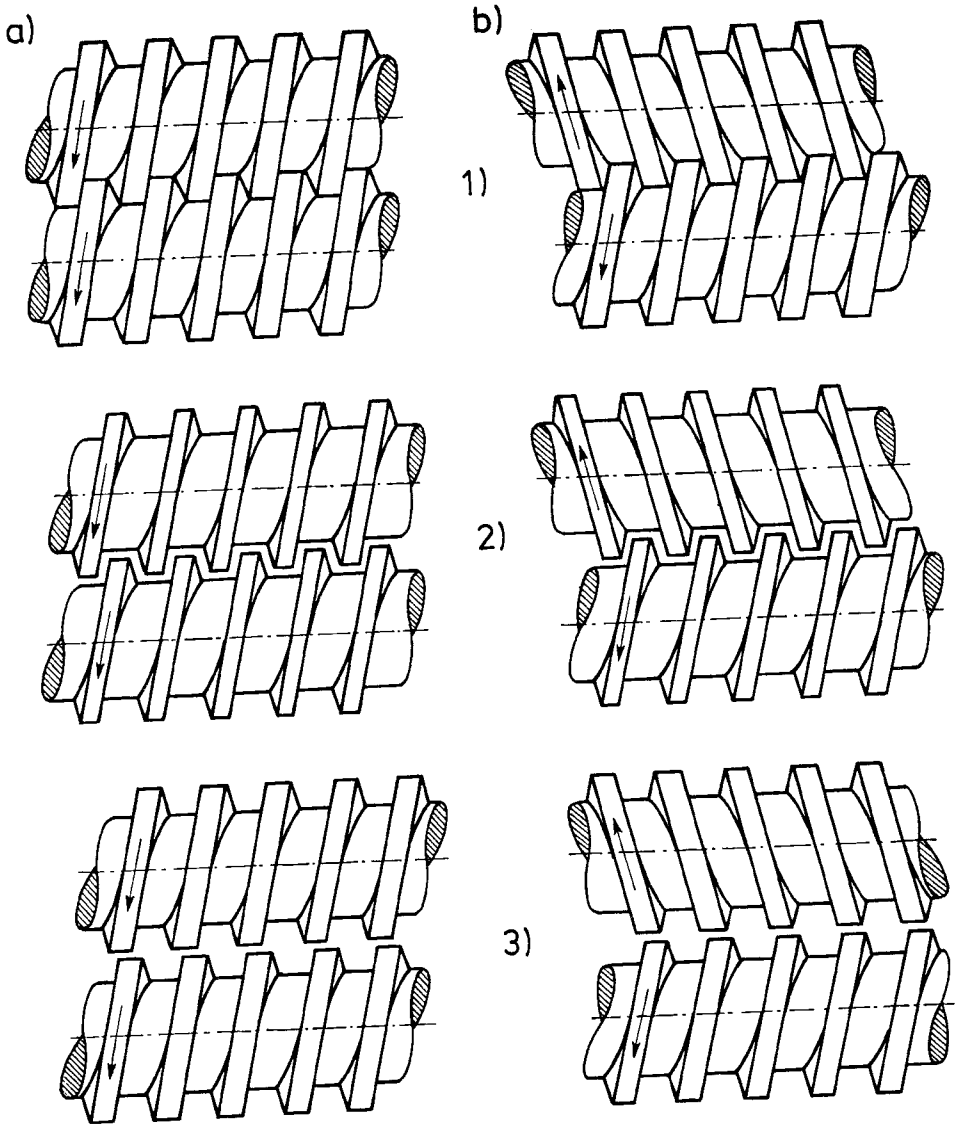
— przeciwbieżne; ślimaki wykonują ruch obrotowy w kierunkach przeciwnych, natomiast z uwagi na zazębianie się zwojów — na ślimaki:

— zazębiające się szczelnie,

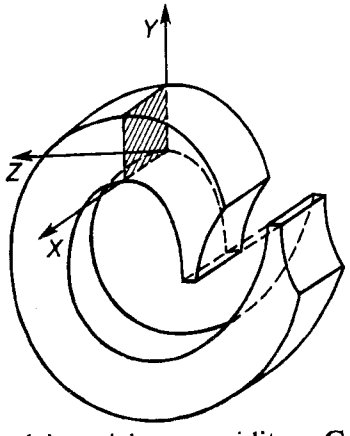
— zazębiające się nieszczelnie,

— nie zazębiające się.

Ze względu na zalety największe zainteresowanie budzą układy ze ślimakami o zwojach zazębiających się nieszczelnie, czyli mających określone luzy międzyzwojowe — promieniowe i osiowe, które spełniają istotną rolę w procesie przetwórstwa. Układy te będą dalej zwięźle scharakteryzowane.



Rys. 1.12. Odmiany układów dwuślimakowych: a) współbieżny, b) przeciwbieżny, 1) o zwojach zazębiających się szczelnie, 2) o zwojach zazębiających się nieszczelnie, 3) ze zwojami nie zazębiającymi się



Rys. 1.13. Bruzda (komora) w kształcie zwichrowanej litery C

W układach współbieżnych tworzą się odcinki kanałów śrubowych w dużym stopniu zamknięte poprzecznie, a transportowanie tworzywa odbywa się z wykorzystaniem sił wleczących tworzywo; połączenie wzdłużne wydzielonych odcinków

kanałów ślimaków zapewnia dobre mieszanie tworzywa, a w układach przeciwbieżnych tworzą się odcinki kanałów, w dużym stopniu zamknięte poprzecznie i wzdłużnie, czyli bruzdy (komory) w kształcie zwichrowanej litery C (rys. 1.13), które łączą ze sobą tylko szczeliny międzyzwojowe, a transportowanie tworzywa jest ściśle wymuszone.

Rozróżnia się dwa podstawowe kształty geometryczne ślimaków, a mianowicie ślimaki *walcowe* i *stożkowe*. W jednym i drugim przypadku ślimaki są charakteryzowane głównie następującymi elementami geometrycznymi:

— *stosunkiem długości części roboczej do średnicy zewnętrznej* L/D; wynosi ona zazwyczaj $12 \div 22$ (tabl. 1.1),

— *głębokością* h kanału; wartość ta zawiera się w granicach na ogół $(0{,}2 \div 0{,}3)D$ dla ślimaków walcowych i $(0{,}13 \div 0{,}2)D_{\check{s}}$ dla ślimaków stożkowych,

— *skokiem t linii śrubowej zwoju*; zawiera się on najczęściej w granicach $(0{,}4 \div 1{,}0)D$ dla ślimaków walcowych i $(0{,}25 \div 0{,}8)D_{\check{s}}$ dla ślimaków stożkowych,

— *stromością* γ_s *linii śrubowej zwoju*, określaną wzorem (1.5),

— *szerokością e grzbietu zwoju*; na ogół wynosi ona $(0{,}2 \div 0{,}4)D$ dla ślimaków walcowych i $(0{,}1 \div 0{,}3)D_{\check{s}}$ dla ślimaków stożkowych,

— *stosunkiem szerokości grzbietu zwoju do skoku linii śrubowej* e/t; zazwyczaj $e/t = 0{,}4 \div 0{,}44$ dla ślimaków walcowych i $0{,}35 \div 0{,}44$ dla ślimaków stożkowych,

— *krotnością i* zwojów; dość często krotność zwojów równa się jeden, a największa ich krotność wynosi cztery,

— *kątem* ψ *pochylenia płaszczyzny bocznej zwoju* w stosunku do płaszczyzny prostopadłej do wierzchołków zwojów; zawiera się on w granicach $4 \div 10\,(\pi/180)$ rad,

— *redukcją objętości kanałów*, zwaną dawniej stopniem sprężania, definiowaną jak w układach jednoślimakowych; redukcja całkowita wynosi najczęściej $1{,}4 \div 2$,

— *otworem wzdłużnym* o średnicy $(0{,}15 \div 0{,}25)D$ do chłodzenia, zwłaszcza końcówek ślimaka, na ogół za pomocą oleju przepływającego pod ciśnieniem,

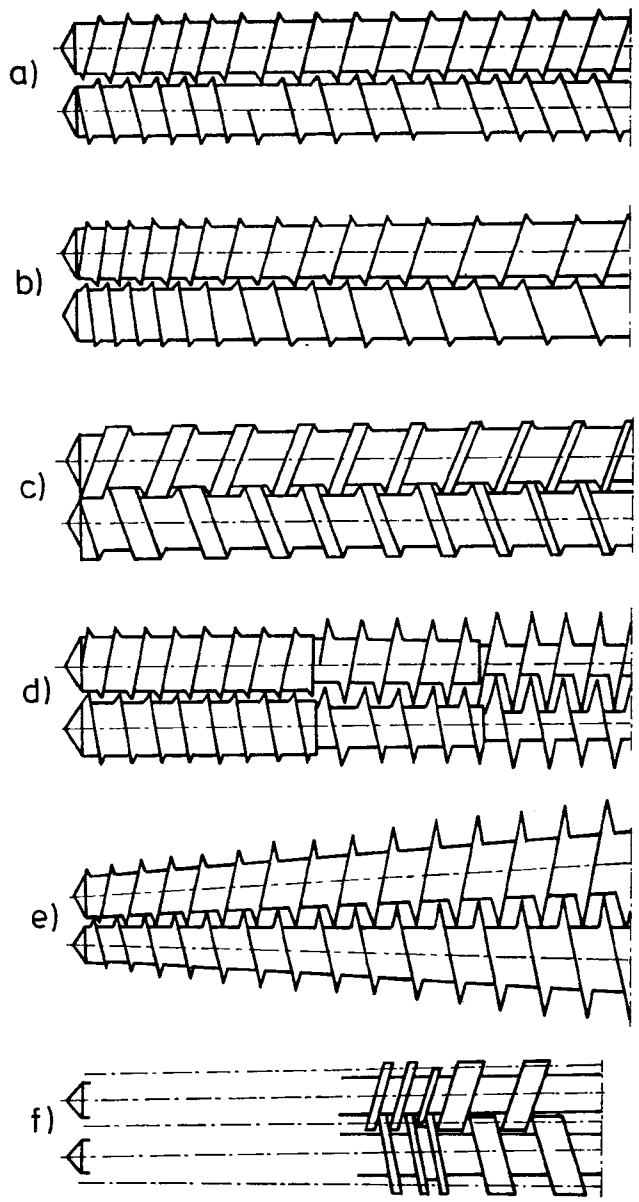
— *połową kąta wierzchołkowego stożka* według tworzącej poprowadzonej wzdłuż płaszczyzny wierzchołków zwojów; z reguły wynosi ona $(\pi/180)$ rad, ale może również być większa (tylko w ślimakach stożkowych).

Zakresy wartości liczbowych wymienionych elementów charakteryzujących ślimaki są mniejsze niż w przypadku układów jednoślimakowych, co wynika z tego, że układy dwuślimakowe stosuje się przede wszystkim do wytłaczania PVC, przy czym tworzywo wejściowe ma kształt proszku.

Żądaną redukcję objętości kanałów osiąga się poprzez [1.88] zmniejszanie skoku linii śrubowej zwoju (ciągłe lub stopniowe), głębokości kanałów i średnicy ślimaków (stosowanie ślimaków stożkowych) oraz wskutek zwiększania szerokości i krotności zwojów (rys. 1.14).

Poprawny przebieg procesów w układzie dwuślimakowym, zwłaszcza ich ciągłość, wymaga umownego podziału ślimaków na podstawowe strefy: zasypu I, zasilania II, przemiany (sprężania) III, odgazowania IV i dozowania V (rys. 1.15).

Zadania stref I, II, III i V są w istocie takie same jak analogicznych stref w układzie jednoślimakowym. W najczęstszym przypadku uplastyczniania PVC do układu dwuślimakowego jest wprowadzana nieuchronnie dość duża ilość powietrza i wody,

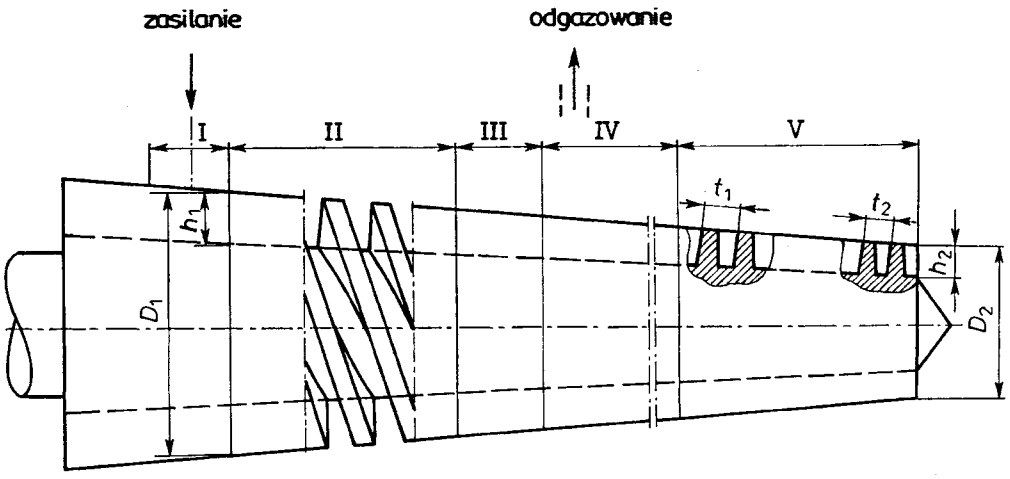


Rys. 1.14. Schematy ślimaków z układów dwuślimakowych zapewniających żądaną redukcję objętości kanałów: a) stopniowe zmniejszanie skoku linii śrubowej zwoju, b) ciągłe zmniejszanie skoku linii śrubowej zwoju, c) zwiększanie szerokości zwojów — ślimaki Mapre, d) zmniejszanie głębokości kanałów — ślimaki Colombo, e) zmniejszanie średnicy ślimaków — ślimaki stożkowe Cincinnati i Krauss Maffei, f) zwiększanie krotności zwojów — ślimaki Kestermann

co wynika z porowatości ziarn PVC oraz właściwości higroskopijnych niektórych składników dodatkowych. Powietrze i woda muszą być odprowadzone z układu, gdyż znacznie pogarszają jakość otrzymywanego wytworu. Zachodzi to w strefie odgazowania, w której ziarna PVC osiągają temperaturę wyższą od 100°C, ale jeszcze nie ulegają aglomeracji. Ponieważ w temperaturze tej mogą się również wydzielać ze składników dodatkowych substancje lotne, zatem odprowadzać należy powietrze, parę wodną i owe substancje lotne. W strefie odgazowania następuje miejscowa deredukcja objętości kanału, powodująca uwolnienie wymienionych gazów.

Ślimaki z układów dwuślimakowych dzieli się ogólnie na ślimaki klasyczne i niekonwencjonalne.

Ślimaki klasyczne są w zasadzie zbudowane tak samo, jak w układach jednoślimakowych. Poszczególne rozwiązania różnią się przede wszystkim sposobem zmniejszania głębokości i skoku kanału, na przykład głębokość kanałów ślimaków stożkowych zmniejsza się w kierunku od strefy zasilania do strefy dozowania, od h_1



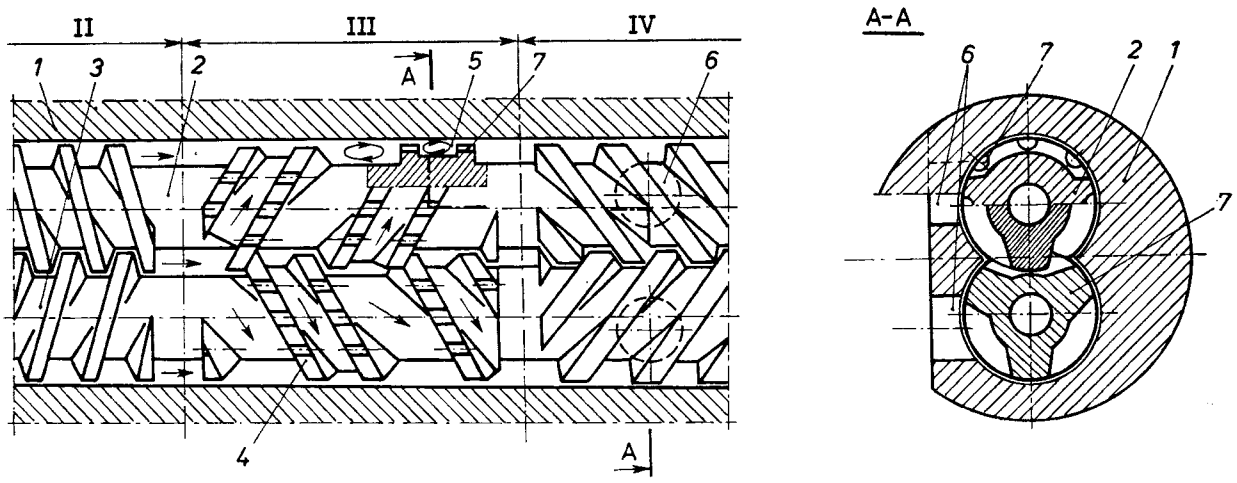
Rys. 1.15. Strefy ślimaków z układów dwuślimakowych na przykładzie ślimaków stożkowych: I — strefa zasypu, II — strefa zasilania, III — strefa przemiany (sprężania), IV — strefa odgazowania, V — strefa dozowania

do h_2 (rys. 1.15), przy czym $(h_1-h_2)/h_2$ wynosi około jeden [1.59] bądź wynosi $0{,}45(D_1-D_2)/D_2$, a skok w strefie dozowania maleje od t_1 do t_2 o 30% [1.62].

Ślimaki niekonwencjonalne zawierają różnie rozwiązane strefy, z wyjątkiem strefy zasilania, która na ogół pozostaje klasyczna. Ślimaki walcowe w strefie przemiany mogą być wyposażone w pierścienie stożkowe z otworami wzdłużnymi, odwrócone względem siebie tak, że w obszarze współpracy osie otworów wzdłużnych pokrywają się [1.58]. Strefa przemiany może zawierać pojedyncze zwoje, o kierunku pochylenia linii śrubowej przeciwnym do kierunku w strefie zasilania i odgazowania, posiadające wycięcia promieniowe. Wycięcia zazębiających się ślimaków są przesunięte względem siebie, ich głębokość może być różna, a przekrój poprzeczny jest stały na długości lub zmniejsza się w kierunku przepływu tworzywa [1.57]. Wymienione pierścienie z otworami i zwoje z wycięciami są elementami intensyfikującymi ścinanie i mieszanie tworzywa. Na rysunku 1.16 przedstawiono przykładowo fragment rozwiązania układu dwuślimakowego walcowego przeciwbieżnego, składającego się ze ślimaków (*2*) i (*3*) zawierających strefy zasilania II, przemiany III i odgazowania IV. Strefa zasilania jest rozwiązana klasycznie, strefa przemiany ma pojedyncze zazębiające się zwoje (*4*) o przeciwnym kierunku pochylenia linii śrubowej, wyposażone w kanały dodatkowe (*5*), w których zachodzi intensywne ścinanie i mieszanie, natomiast strefa odgazowania ma kanały o większym niż w strefie zasilania i odgazowania kącie pochylenia linii śrubowej.

1.2.3. Ślimaki w innych układach

Dążąc do zwiększenia natężenia wypływu tworzywa z układu uplastyczniającego, polepszenia jakości wytworów oraz do efektywniejszego uplastyczniania tworzyw trudno przetwarzalnych, opracowano układy ślimakowe trój- i więcej ślimakowe, kaskadowe, planetarne i inne. Już bowiem w 1977 r. stwierdzono [1.102], że w zakresie zwiększania natężenia wypływu z układów jedno- i dwuślimakowych osiągnięto

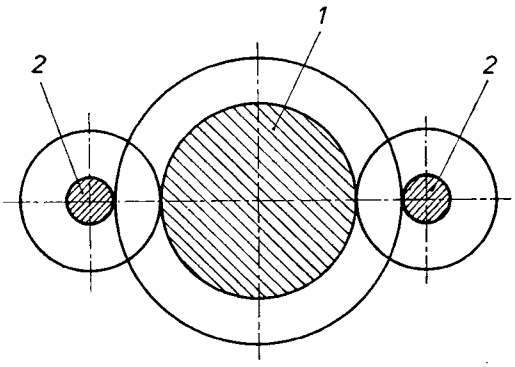


Rys. 1.16. Fragment rozwiązania układu dwuślimakowego walcowego przeciwbieżnego: II — strefa zasilania, III — strefa przemiany, IV — strefa odgazowania, *1* — cylinder, *2* i *3* — ślimaki walcowe przeciwbieżne, *4* — pojedyncze zazębiające się zwoje, *5* — kanały dodatkowe, *6* — otwory cylindra odgazowujące, *7* — wycięcia [1.61]

poziom trudny do istotnego przekroczenia. Omawiane w niniejszym punkcie układy stosowane są wyłącznie do wytłaczania.

Ślimaki w układzie trój- i więcej ślimakowym

W układzie trójślimakowym zazwyczaj jeden ślimak główny jest o większej średnicy (np. 220 mm), a dwa pozostałe boczne — o jednakowej mniejszej średnicy (np. 110 mm) i usytuowane są wzdłuż jednej osi (rys. 1.17). Układy czteroślimakowe bywają

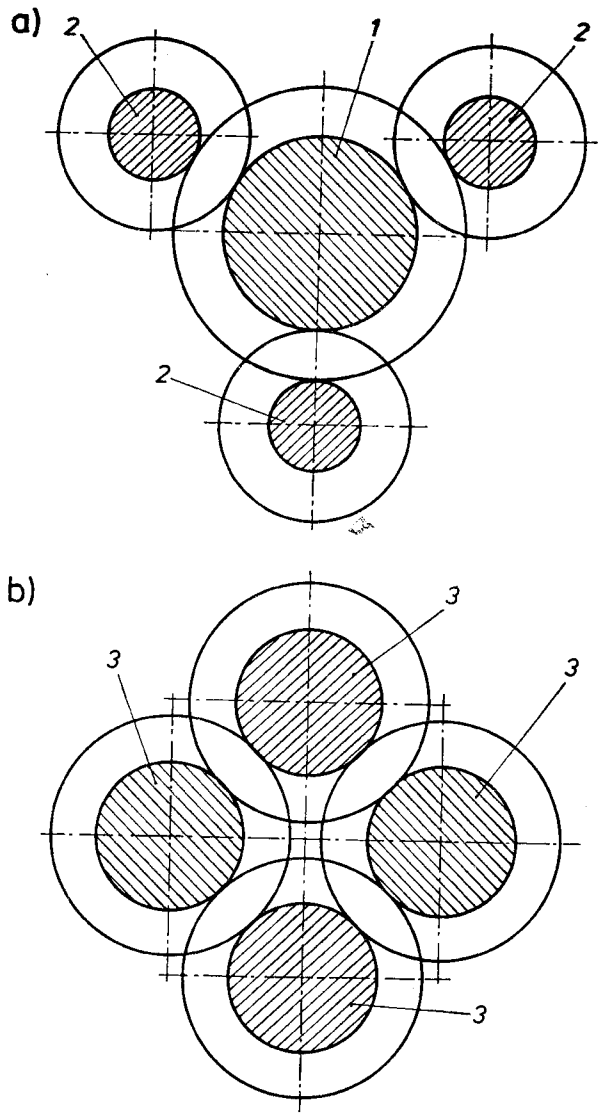


Rys. 1.17. Schemat przekroju poprzecznego przez układ trójślimakowy: *1* — ślimak główny, *2* — ślimaki boczne; ślimaki Krauss Maffei

typu gwiazdy ze ślimakiem centralnym o większej średnicy i pozostałymi bocznymi — o jednakowej mniejszej (rys. 1.18a) lub *typu pierścienia* z wszystkimi ślimakami o jednakowej średnicy (rys. 1.18b).

Ślimaki w układzie kaskadowym

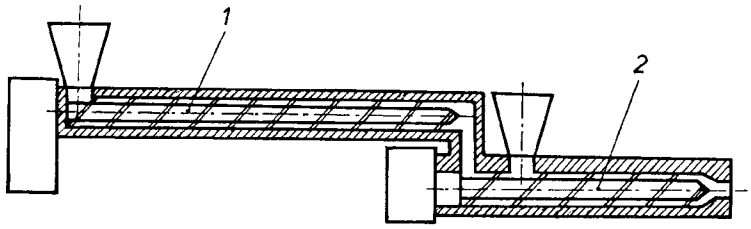
W układzie kaskadowym ślimaki mogą być rozmieszczone jak w układzie dwuślimakowym walcowym, lecz z pionową osią główną, a jeden ze ślimaków, np. górny, jest krótszy; układ taki można więc traktować jako jedno-dwuślimakowy. Podobnie są rozwiązywane układy kaskadowe trójślimakowe z pionową osią główną, w których ślimak główny jest dłuższy od obu ślimaków bocznych. Spotyka się również układy



Rys. 1.18. Schemat przekroju poprzecznego przez układ czteroślimakowy: a) typu gwiazda, b) typu pierścień; *1* — ślimak centralny, *2* — ślimaki boczne, *3* — ślimaki zewnętrzne

kaskadowe czteroślimakowe walcowe, w których dwa ślimaki górne są krótsze od dwóch ślimaków dolnych [1.10, 1.31].

Układ kaskadowy stanowią połączone szeregowo dwa układy jednoślimakowe: jeden — uplastyczniania wstępnego, drugi — ostatecznego (rys. 1.19). Na przykład firma Cincinnati (USA) wytwarza wytłaczarki kaskadowe, w których ślimak układu



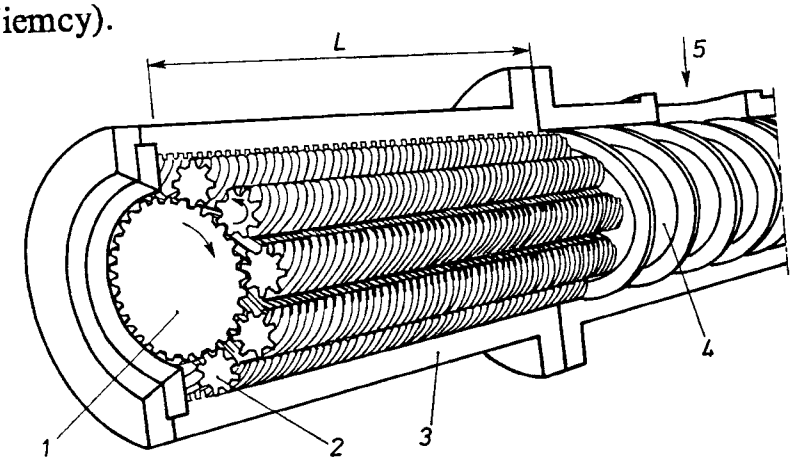
Rys. 1.19. Schemat przekroju wzdłużnego przez układ kaskadowy składający się z połączonych szeregowo układów jednoślimakowych uplastyczniania wstępnego (*1*) i ostatecznego (*2*)

uplastyczniania wstępnego ma średnicę 125 mm i $L/D = 11$, a ślimak uplastyczniania ostatecznego ma taką samą średnicę i $L/D = 8$, pomiędzy ślimakami zaś jest umieszczony układ odgazowania. W układzie tym wytwarza się podciśnienie [1.20]. Łączone szeregowo mogą być również układy dwuślimakowe, np. firma Oerlikon (Szwajcaria) wytwarza wytłaczarki wyposażone w walcowe ślimaki uplastyczniania wstępnego o $L/D = 7$ i o obrotach współbieżnych oraz w walcowe ślimaki uplastyczniania ostatecznego o $L/D = 15$ i o obrotach przeciwbieżnych, zakończonych na długości $3D$ ślimakami stożkowymi.

Ślimaki w układzie planetarnym

Układ planetarny ślimaków składa się ze ślimaka centralnego o stosunkowo dużej średnicy (100÷300 mm), wykonującego ruch obrotowy, i z od kilku do kilkunastu zazębiających się z nim ślimaków planetarnych o mniejszej średnicy (20÷100 mm), wykonujących ruch planetarny bez wzajemnego zazębiania. Ślimaki zazwyczaj są o długości $(3 \div 6)D$ i mają duży kąt pochylenia linii śrubowej zwoju, np. przeznaczone do PVC — $(\pi/4)$ rad.

Układ planetarny ślimaków nie stanowi całego układu uplastyczniającego z kilku przyczyn, z których ważniejszą jest trudność w zabieraniu tworzywa z zasobnika. Klasycznym rozwiązaniem jest szeregowe liniowe łączenie jednoślimakowego układu uplastyczniania wstępnego z układem planetarnym uplastyczniania ostatecznego (rys. 1.20). Innym rozwiązaniem jest szeregowe liniowe łączenie wymienionego układu z układem jednoślimakowym. Wówczas układ uplastyczniający składa się z: jednoślimakowego układu uplastyczniania wstępnego, planetarnego układu uplastyczniania zasadniczego i jednoślimakowego układu uplastyczniania wykańczającego. Takie układy nazywa się układami liniowymi ślimakowo-planetarnymi. Spotyka się również układy planetarno-kaskadowe, składające się z układu ślimakowo-planetarnego uplastyczniania wstępnego i zasadniczego, jak na rys. 1.20, i połączonego z nim kaskadowo jednoślimakowego układu uplastyczniania wykańczającego. Wszystkie wymienione układy są produkowane przez firmę Battenfeld (Niemcy).



Rys. 1.20. Układ ślimakowo-planetarny liniowy: *1* — ślimak centralny, *2* — ślimaki planetarne, *3* — cylinder, *4* — ślimak układu jednoślimakowego, *5* — wprowadzenie tworzywa do układu uplastyczniającego, *L* — długość układu planetarnego

1.2.4. Funkcje i budowa cylindra

Z funkcji spełnianych przez układ uplastyczniający wynikają wymagania, jakie powinien spełniać cylinder. Są to głównie:

— odpowiednie ukształtowanie i struktura geometryczna powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej,

— przenoszenie obciążenia wywołanego ciśnieniem uplastycznianego tworzywa i masą układu uplastyczniającego,

— odkształcanie w zakresie umożliwiającym właściwą współpracę ślimaka lub ślimaków,

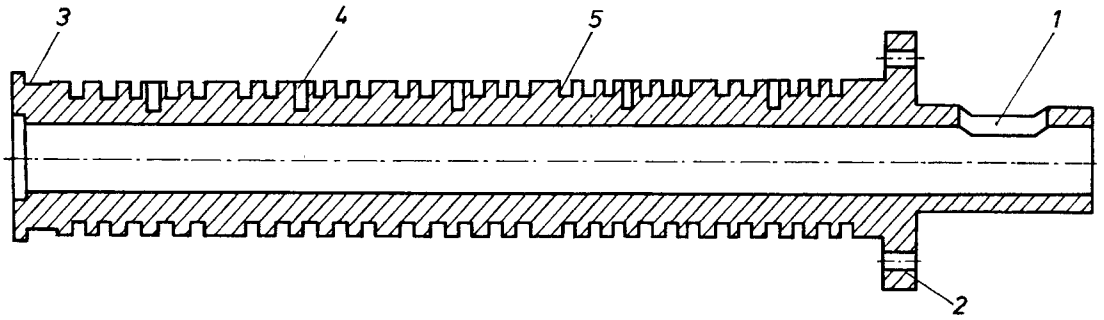
— żądane przenoszenie ciepła w kierunku do tworzywa, ale również w kierunku od tworzywa.

Tak więc są to wymagania różnorodne i aby im sprostać, stosuje się wiele rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych cylindra.

Wewnątrz cylindra znajduje się otwór lub otwory przelotowe walcowe o średnicy nominalnej równej średnicy nominalnej ślimaka lub ślimaków, na ogół wykonane w klasie dokładności H7. Ponieważ pomiędzy grzbietem zwoju ślimaka a powierzchnią wewnętrzną cylindra musi być zachowana szczelina o grubości s (rys. 1.2), zwana *luzem*, przy czym

$$s = (0{,}002 \div 0{,}006)\, D \tag{1.6}$$

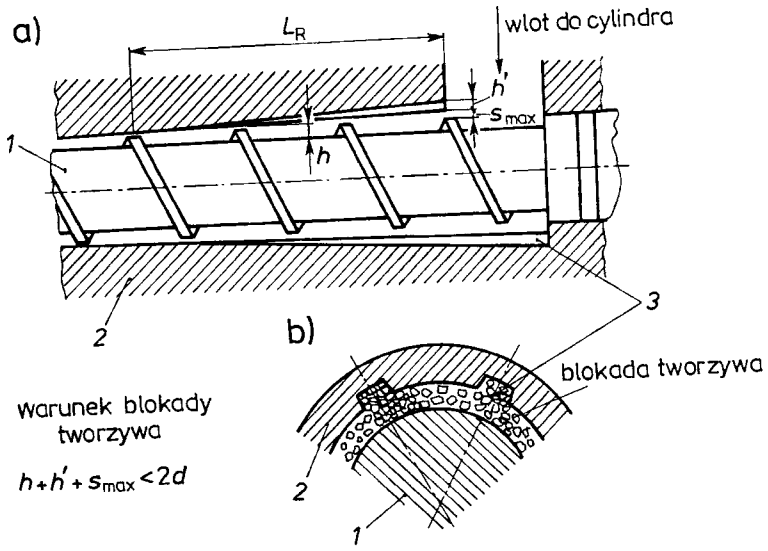
więc średnica zewnętrzna ślimaka ma ujemne odchyłki wymiaru, np. $\varnothing 45^{-0,15}_{-0,25}$. Powierzchnia zewnętrzna cylindra jest zazwyczaj walcowa w układzie uplastyczniającym wtryskarek i rowkowana w układzie uplastyczniającym wytłaczarek (rys. 1.21). Rowki zewnętrzne są prostopadłe do osi cylindra bądź są śrubowe o bardzo dużej stromości i służą do przepływu czynnika chłodzącego, np. powietrza czy wody.



Rys. 1.21. Schemat cylindra układu uplastyczniającego wytłaczarek: *1* — otwór zasypowy, *2* — kołnierz i otwory do mocowania układu w korpusie wytłaczarki, *3* — zakończenie cylindra do mocowania głowicy wytłaczarskiej, *4* — gniazda do czujników termoelektrycznych, *5* — rowki prostopadłe do osi cylindra, tworzące kanały do powietrza chłodzącego

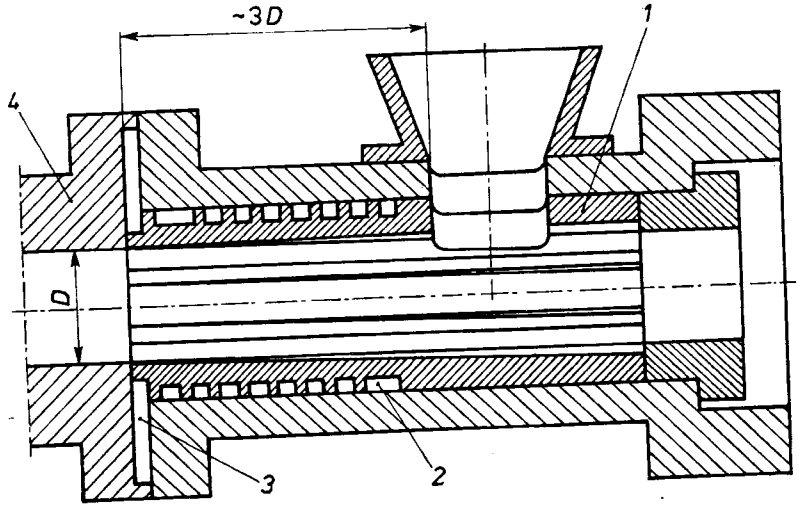
W przypadku jednoślimakowego układu uplastyczniającego wytłaczarek, w strefie zasypu i w obszarze strefy zasilania na długości na ogół $L_R = 3D$, otwór cylindra może mieć rowki rozmieszczone na całym obwodzie, wzdłużne lub śrubowe, ze względów technologicznych wykonane w tulei, którą następnie wciska się w cylinder.

Pierwszą dostępną informację na ten temat — jak wynika z literatury — przedstawił w 1968 r. G. Fuchs [1.22, 1.74]. Rowki mają zmienną głębokość, największą w strefie zasypu, i zanikają w strefie zasilania na długości L_R (rys. 1.22). Rowki powodują, że tworzywo zostaje lepiej zabierane z zasobnika i wprowadzane do kanału ślimaka, oraz zwiększają tarcie i przez to ciśnienie w strefie zasilania, a w konsekwencji — natężenie przepływu tworzywa w układzie ślimakowym.



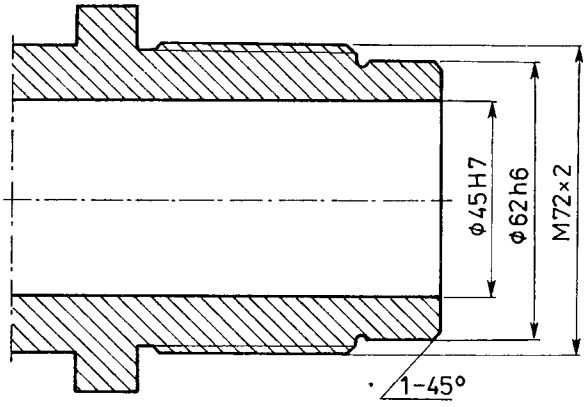
Rys. 1.22. Schemat fragmentu układu uplastyczniającego z cylindrem rowkowanym: a) przekrój wzdłużny, b) przekrój poprzeczny, L_R — długość strefy rowkowanej w obszarze strefy zasilania, h — głębokość kanału śrubowego, h' — największa głębokość rowków w cylindrze, s_{max} — maksymalny luz, d — najmniejszy wymiar cząstek tworzywa; *1* — ślimak, *2* — cylinder, *3* — rowki cylindra

Wskutek zwiększonego tarcia w strefie rowkowanej tworzywo mogłoby ulegać przedwczesnemu uplastycznieniu, dlatego strefę tę należy intensywnie chłodzić (rys. 1.23). Układy uplastyczniające z cylindrami rowkowanymi charakteryzują się zatem głównie znaczną intensywnością procesu transportu, lecz gorszą sprawnością energetyczną. Strefa rowkowana ulega stosunkowo szybkiemu zużywaniu tribologicznemu. Ślimaki stosowane do takich układów mogą mieć małą redukcję objętości kanału, a nawet redukcję mniejszą od jedności, czyli deredukcję — jak w rozwiązaniu firmy Reifenhäuser (Niemcy) [1.54].



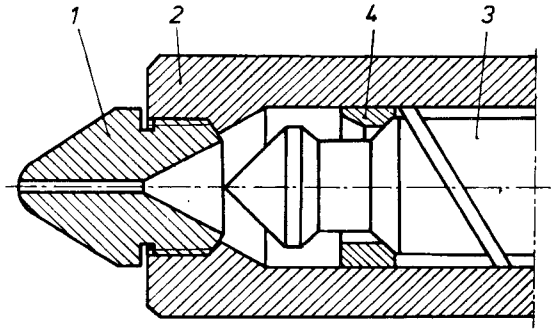
Rys. 1.23. Klasyczne rozwiązanie konstrukcyjne strefy rowkowanej (przekrój wzdłużny): *1* — tuleja rowkowana, *2* — rowki prostopadłe do osi, tworzące kanały chłodzące, *3* — szczeliny do izolacji cieplnej, *4* — cylinder

Zakończenie układu uplastyczniającego jest inne w przypadku wytłaczania i wtryskiwania. Ślimak układu uplastyczniającego wytłaczarki ma zakończenie kuliste lub stożkowe, często wymienne (wkręcane), zależne od rodzaju tworzywa, natomiast zakończenie cylindra ma gwint do mocowania głowicy wytłaczarskiej (rys. 1.24).

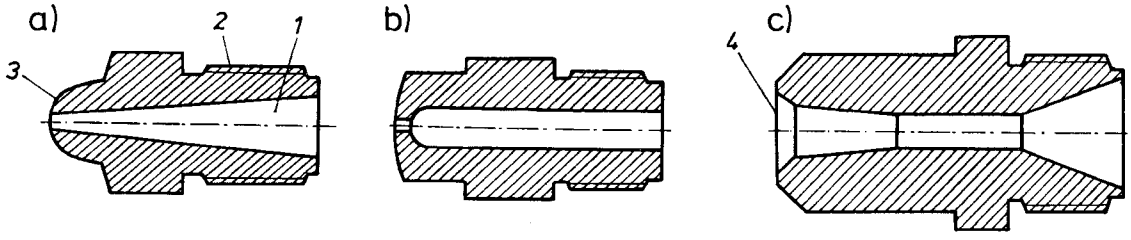


Rys. 1.24. Rozwiązanie konstrukcyjne zakończenia cylindra wytłaczarki (przykład)

Ślimak układu uplastyczniającego wtryskarki jest zaopatrzony w zakończenie stożkowe, przeznaczony do PVC — ze zwojem śrubowym, wymienne bądź układ ma końcówkę o charakterze uniwersalnym z zaworem pierścieniowym zwrotnym, zabezpieczającym przed cofaniem się tworzywa w czasie ruchu wstecznego ślimaka (rys. 1.25). Cylinder zaś kończy się dyszą wkręcaną na gwint, jak to pokazano na rys. 1.25. Dysze normalne są to tuleje, w których kanał przepływowy, współosiowy z układem uplastyczniającym, ma kształt stożka, walca lub komory walcowej



Rys. 1.25. Przykład zakończenia układu uplastyczniającego wtryskarki z zaworem pierścieniowym zwrotnym: *1* — dysza układu uplastyczniającego, *2* — cylinder, *3* — ślimak, *4* — pierścień ruchomy z wycięciami



Rys. 1.26. Dysze normalne układu uplastyczniającego: a) z kanałem stożkowym, b) z kanałem w kształcie komory walcowej z przewężką, c) z kanałem walcowym i stożkowym (z wydłużoną drogą przepływu): *1* — kanał, *2* — gwint do wkręcenia na końcu ślimaka, *3* — zakończenie kuliste dyszy, *4* — zakończenie płaskie dyszy

POLITECHNIKA POZNAŃSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA W POZNANIU

z przewężką (rys. 1.26). Dysza na rys. 1.26a charakteryzuje się większą łatwością przepływu tworzywa, natomiast dysza z rys. 1.26b umożliwia osiągnięcie większej prędkości wtryskiwanego tworzywa.

Wykonanie cylindrów do układu dwuślimakowego, zwłaszcza stożkowego, sprawia wiele kłopotów i wymaga specjalnego oprzyrządowania do wytaczania i docierania otworów na ślimaki. Podobnie trudne do wykonania są cylindry do układów trój- i czteroślimakowych. Stanowi to jedną z głównych wad tych układów. Cylindry do wszystkich układów są wykonywane ze stali konstrukcyjnej do azotowania, podobnego gatunku jak ślimaki, a otwory na ślimaki poddawane procesowi azotowania, bądź są wykonane ze stali węglowej konstrukcyjnej, a otwory powlekane stopami metali odpornymi na zużycie tribologiczne [1.76]. Te ostatnie noszą w literaturze nazwę cylindrów bimetalicznych. Cylindry bimetaliczne odznaczają się $3 \div 10$ razy większą trwałością niż wykonane ze stali do azotowania, ale są droższe o $25 \div 50\%$. Z kilku metod produkcji cylindrów bimetalicznych na wyróżnienie zasługuje metoda Xaloy i metoda Bernex [1.81, 1.86].

1.3. Zasobnik i strefa zasypu

Ślimakowy układ uplastyczniający, niezależnie od liczby ślimaków, jest wyposażony w zasobnik tworzywa wejściowego do procesu uplastyczniania. Bezpośrednio pod otworem wysypowym tworzywa z zasodnika, czyli u wylotu zasobnika, znajduje się strefa zasypu ślimaka lub ślimaków.

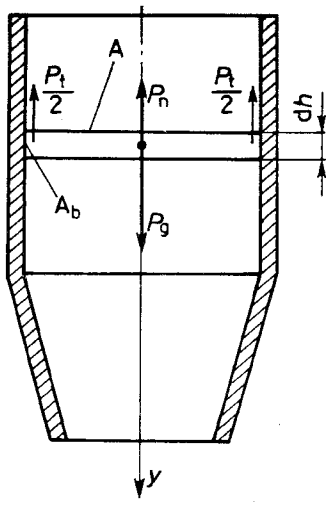
Zwykle zakłada się, że ciśnienie początkowe tworzywa w strefie zasypu jest równe ciśnieniu atmosferycznemu. W dokładniejszych analizach należy jednak przyjąć, że ciśnienie początkowe tworzywa jest równe ciśnieniu panującemu w otworze wysypowym tworzywa z zasobnika. Do jego wyznaczenia przyjmuje się założenie, że ziarna tworzywa w zasobniku tworzą ośrodek idealnie sypki, czego konsekwencją jest model odkształcenia polegający na przemieszczaniu się ziarn względem siebie, przy czym odkształcenie pojedynczych ziarn nie wpływa na proces odkształcania ośrodka, a ośrodek nie ma zdolności do przenoszenia naprężenia rozciągającego. Poza tym zakłada się, że spośród trzech głównych naprężeń ściskających działających w danym punkcie ośrodka jedynie naprężenia maksymalne i minimalne decydują o przemieszczaniu się tworzywa, ale naprężenie maksymalne jest skierowane wdłuż wysokości zasobnika (pionowo).

Na ogół zasobnik jest zbiornikiem o stałym lub zmiennym przekroju poprzecznym. Na podstawie pracy K. Wilczyńskiego [1.107] wykorzystującej model D. Walkera [1.103] można napisać, że na poziomą warstwę tworzywa, o gęstości nasypowej ρ_n, wyodrębnioną myślowo w zasobniku, o grubości elementarnej dh, polu powierzchni A i powierzchni bocznej A_b, działają następujące siły (rys. 1.27):

— siła P_n powstająca w wyniku różnicy naprężenia normalnego

$$P_n = (p + dp)A - pA \tag{1.7}$$

Rys. 1.27. Schemat przekroju wzdłużnego zasobnika walcowo-stożkowego z zaznaczeniem sił działających na warstwę elementarną tworzywa (oznaczenia w tekście)



— siła P_t będąca wynikiem istnienia naprężenia stycznego τ na powierzchni bocznej A_b

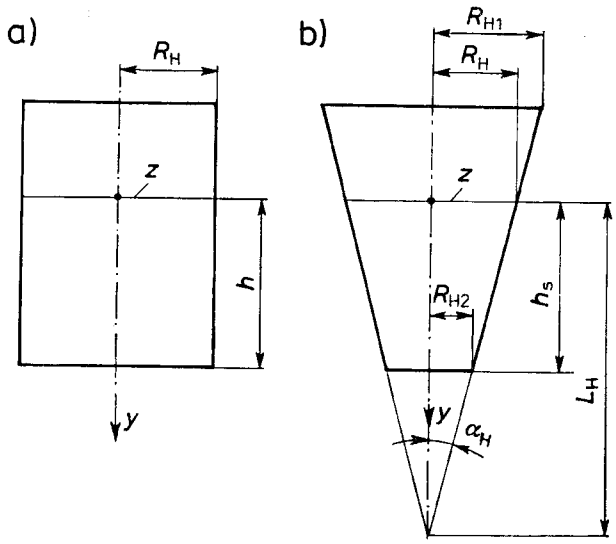
$$P_t = \tau A_b \tag{1.8}$$

— ciężar P_g warstwy

$$P_g = \rho_n g A \, dh \tag{1.9}$$

Bilans tych sił jest następujący:

$$P_g = P_n + P_t \tag{1.10}$$



Rys. 1.28. Elementy geometryczne zasobnika: a) walcowego, b) stożkowego; z — warstwa zewnętrzna tworzywa, h, h_s — wysokość napełniania zasobnika tworzywem, pozostałe oznaczenia w tekście

W przypadku zasobnika o stałym przekroju poprzecznym rozwiązanie równania (1.10) ma postać wzoru na rozkład ciśnienia tworzywa w zasobniku (rys. 1.28a)

$$p_z = p_0 \exp\left\{ -\frac{2 B a y}{R_H} + \frac{\rho_n g R_H}{2 B a}\left[1 - \exp\left(-\frac{2 B a y}{R_H}\right)\right]\right\} \tag{1.11}$$

gdzie p_0 stanowi ciśnienie dodatkowe panujące na zewnętrznej warstwie tworzywa (ponad wartość ciśnienia atmosferycznego), a — współczynnik rozkładu naprężenia normalnego ($a \geqslant 1$); do wielu obliczeń można przyjmować $a = 1$, y — współrzędną,

w kierunku wysokości zasobnika z początkiem umieszczonym na powierzchni zewnętrznej tworzywa, g — przyspieszenie ziemskie, R_H — wymiar charakterystyczny, równy podwojonemu stosunkowi powierzchni przekroju zasobnika do jego obwodu, np. w odniesieniu do zasobnika walcowego R_H jest równe promieniowi.

Wartość B we wzorze (1.11) określają następujące zależności

$$B = \frac{\sin \kappa_0 \sin \delta}{1 - \cos \kappa_0 \sin \delta} \tag{1.12}$$

$$\kappa_0 = \beta_w + 180 - \text{arc sin}\left(\frac{\sin \beta_w}{\sin \delta}\right) \tag{1.13}$$

$$\beta_w = \text{arc tg}\, \mu_w \tag{1.14}$$

w których μ_w oznacza współczynnik tarcia między tworzywem a ścianką zasobnika, a δ — kąt tarcia wewnętrznego tworzywa.

Gdy natomiast zasobnik jest zbieżny, o przekroju kołowym lub kwadratowym, rozwiązanie równania (1.10) ma postać (rys. 1.28b)

$$p_{zs} = p_0\left(\frac{L_H - y}{L_H}\right)^{C_H} + \frac{\rho_n g\,(L_H - y)}{C_H - 1}\left[1 - \left(\frac{L_H - y}{L_H}\right)^{C_H - 1}\right] \tag{1.15}$$

gdzie $L_H = R_H/\text{tg}\,\alpha_H$, α_H — połowa kąta wierzchołkowego zasobnika, przy czym

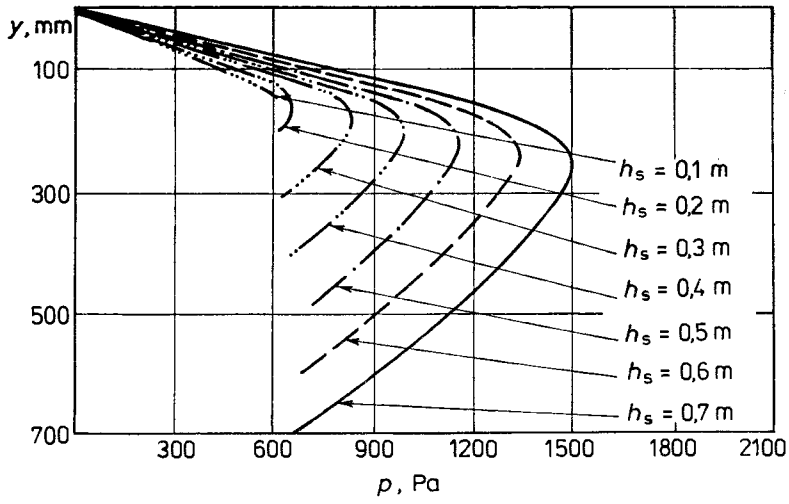
$$C_H = \frac{2\,B_s\,a}{\text{tg}\,\alpha_H} \tag{1.16}$$

$$B_s = \frac{\sin\,(2\,\alpha_H + \kappa_{0s})\sin\,\delta}{1 - \cos\,(2\alpha_H + \kappa_{0s}\,\sin\,\delta)} \tag{1.17}$$

$$\kappa_{0s} = \beta_w + \text{arc sin}\,\frac{\sin\,\beta_w}{\sin\,\delta} \tag{1.18}$$

gdzie indeks s dotyczy zasobnika zbieżnego.

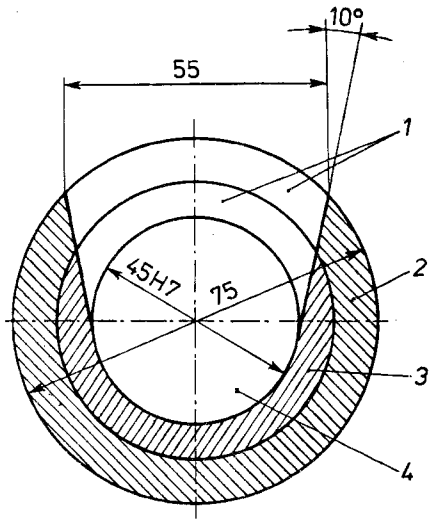
Na przykładzie PE-LD stwierdzono, że w zasobniku stożkowym wysokość h_s jego napełnienia tworzywem nie wywiera w zasadzie wpływu na ciśnienie p w kierunku wysokości zasobnika w otworze wysypowym, z wyjątkiem bardzo małych wartości h_s ($h_s < 200$ mm) — rys. 1.29. Inaczej to wygląda w zasobniku walcowym, w którym ze zmianą wysokości h napełnienia zmienia się wyraźnie ciśnienie w otworze wysypowym. W przypadku zasobnika walcowo-stożkowego (rys. 1.27) w części walcowej następuje wzrost ciśnienia, a w części stożkowej — spadek. Ciśnienie w otworze wysypowym osiąga stosunkowo małe wartości, rzędu $100 \div 1000$ Pa. Ciśnienie to może się jednak zmieniać w sposób istotny w zależności od rodzaju



Rys. 1.29. Wpływ wysokości h_s napełniania tworzywem zasobnika stożkowego na rozkład ciśnienia p w kierunku wysokości y zasobnika: $\rho_n = 600$ kg/m^3, $\mu_w = 0{,}3$, $\delta = 34°$, $R_{H1} = 25$ cm, $R_{H2} = 10$ cm [1.107]

tworzywa i zmieniających się warunków w zasobniku oraz wpływać na proces przyjmowania tworzywa przez ślimak.

Otwór wlotowy tworzywa w cylindrze powinien umożliwiać przyjmowanie tworzywa przez ślimak przy jak najmniejszych oporach ruchu tworzywa (rys. 1.30).



Rys. 1.30. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego otworu wlotowego tworzywa w cylindrze układu jednoślimakowego: *1* — wybranie materiału w cylindrze i tulei, *2* — cylinder, *3* — tuleja rowkowana (na rysunku nie zaznaczono przekroju rowków), *4* — otwór w cylindrze na ślimak

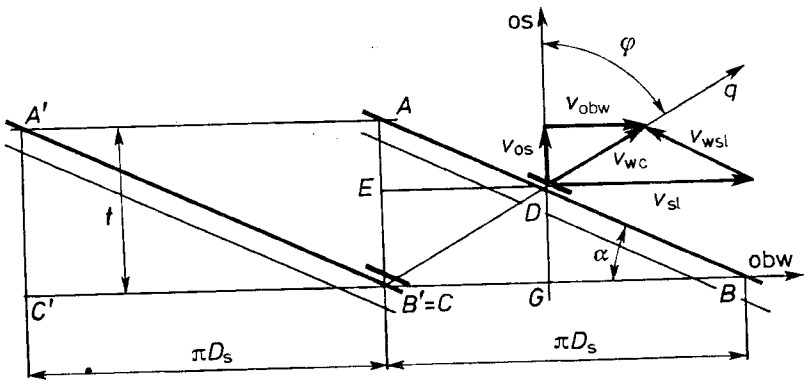
1.4. Zarys teorii układu jednoślimakowego

Zjawisk zachodzących w układzie uplastyczniającym jednoślimakowym nie udało się dotychczas opisać za pomocą uniwersalnej teorii, słusznej dla wszystkich stref ślimaka [1.110]. Ze względu na odmienność zjawisk występujących w poszczególnych strefach, każda z nich ma swoje, w niektórych ujęciach podobne, podstawy teoretyczne.

1.4.1. Strefa zasilania

Strefa zasilania należy do stosunkowo najmniej zbadanych, chociaż jest przedstawiana w licznych opracowaniach. Jak wynika z analizy literatury, jedną z pierwszych publikacji, w której dokładniej przeanalizowano te strefę, jest praca W. Darnella i E. Mola z 1956 r. [1.9]. Zastosowany model i wyniki analizy były wykorzystywane w różnych opracowaniach książkowych do około 1964 r., były również dalej rozbudowywane m.in. przez R. Tornera [1.101] oraz Z. Tadmora i C. Gogosa [1.97]. Nieco odmienne podejście zaprezentowano w pracach radzieckich z lat 1963÷72, przede wszystkim A.W. Silina [1.77]. Od 1968 r. do chwili obecnej ukazuje się wiele prac poświęconych strefie zasilania z cylindrem rowkowanym (p. 1.2.4). W Polsce strefą zasilania zajmuje się od 1980 r. J. Diakun [1.14]. W obszernych monografiach z 1987 i 1991 r. [1.15] przedstawił on w sposób kompleksowy podstawy procesów zachodzących w strefie zasilania.

Na ruch tworzywa w strefie zasilania ma wpływ stosunek sił spójności tworzywa do sił stycznych występujących między tworzywem a ściankami, względem których tworzywo się przemieszcza. Przyjmuje się, że siły spójności tworzywa są większe od sił stycznych, co powoduje, iż brak jest mechanizmu, który wymuszałby ruch tworzywa w kierunku promieniowym (wysokości zwoju ślimaka). Tworzywo wykonuje ruch tylko po powierzchniach walcowych, które po rozwinięciu mogą być przedstawiane na płaszczyźnie. Płaszczyznę tę orientuje się w układzie współrzędnych os (kierunek osiowy) — obw (kierunek obwodowy) (rys. 1.3).



Rys. 1.31. Graficzne przedstawienie kierunków i prędkości ruchu tworzywa i ślimaka; oznaczenia w tekście

Na rysunku 1.31 jest przedstawiony w rozwinięciu na płaszczyźnie fragment powierzchni walcowej ślimaka. Obrót ślimaka jest zobrazowany na płaszczyźnie rozwinięcia przesunięciem linii śrubowej w kierunku obwodowym o wartość πD_s. Jednemu obrotowi ślimaka odpowiada przemieszczenie się linii śrubowej z położenia $A'B'$ do położenia AB. Podczas tego obrotu cząstka tworzywa zostaje przesunięta z punktu B' do punktu D, wykonując przy tym obrót po obwodzie na długości ED, następnie zostaje przesunięta w kierunku osiowym o odcinek GD i przemieszcza się względem powierzchni zwoju ślimaka po linii śrubowej o średnicy D_s od punktu B' do punktu D.

Wielkością wyznaczającą kierunek ruchu cząstki może być kąt φ określający odchylenie prędkości (drogi) ruchu cząstki od kierunku osiowego, zwany *kątem kierunku ruchu*. Wyrażenie

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{ED}{EC} \tag{1.19}$$

wyznacza stosunek drogi w kierunku obwodowym do drogi w kierunku osiowym; dla kąta kierunku ruchu $\varphi = 0$ tworzywo porusza się tylko w kierunku osiowym, ale wraz z powiększaniem się kąta φ maleje składowa osiowa i pojawia się, a następnie zwiększa — składowa obwodowa i wreszcie dla $\varphi = (\pi/2)$ rad tworzywo obraca się już tylko razem ze ślimakiem bez przemieszczania się w kierunku osiowym.

Składowe prędkości liniowej ruchu cząstki otrzymuje się, dzieląc wymienione przemieszczenia przez czas jednego pełnego obrotu ślimaka z prędkością kątową ω, przy czym należy zauważyć, że zwój ślimaka na średnicy D_s ma prędkość obwodową

$$v_{sl} = \tfrac{1}{2} D_s \omega \tag{1.20}$$

Zatem prędkość liniowa względem nieruchomego cylindra na dowolnej średnicy ślimaka jest określona wzorem

$$v_{wc} = \frac{CD}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega t \sqrt{1+\operatorname{tg}^2\varphi}}{2\pi(1+\gamma \operatorname{tg}\varphi)} \tag{1.21}$$

a przy cylindrze

$$v_{wcD} = \frac{\omega \gamma D \sqrt{1+\operatorname{tg}^2\varphi}}{2(1+\gamma \operatorname{tg}\varphi)} \tag{1.22}$$

Prędkość w kierunku osiowym określa wzór

$$v_{os} = \frac{GD}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega t}{2\pi(1+\gamma \operatorname{tg}\varphi)} \tag{1.23}$$

— w kierunku obwodowym

$$v_{obw} = \frac{ED}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega t \operatorname{tg}\varphi}{2\pi(1+\gamma \operatorname{tg}\varphi)} \tag{1.24}$$

— względem ślimaka

$$v_{wsl} = \frac{BD}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega t \sqrt{1+\gamma^2}}{2\pi\gamma(1+\gamma \operatorname{tg}\varphi)} \tag{1.25}$$

Zakładając, że tworzywo całkowicie wypełnia obszar między ślimakiem a cylindrem i że nie występuje strumień przeciekowy tworzywa w szczelinie pomiędzy powierzchnią zewnętrzną zwoju ślimaka a powierzchnią wewnętrzną cylindra ($s = 0$), można wyznaczyć wzór na objętościowe natężenie przepływu tworzywa, nazywane również

wydajnością objętościową strefy zasilania. W tym celu należy pomnożyć prędkość tworzywa względem ślimaka — wzór (1.25), odniesioną do średnicy średniej D_s i do stromości średniej γ_s na tej średnicy, przez pole przekroju poprzecznego kanału ślimaka

$$\frac{D+D_r}{2}(t-e)\cos\alpha_s = \frac{h(t-e)}{\sqrt{1+\gamma_s^2}} \tag{1.26}$$

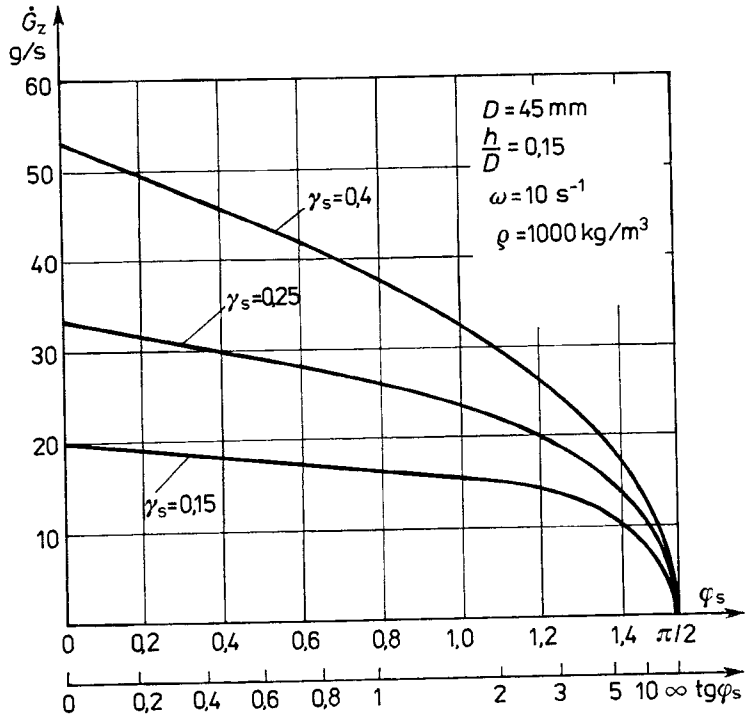
Po wykonaniu działań otrzymuje się

$$\dot{W}_z = \frac{\pi}{2}D^3\left(1-\frac{h}{D}\right)^2\frac{h}{D}\left(1-\frac{e}{t}\right)\omega\frac{\gamma_s}{1+\gamma_s\operatorname{tg}\varphi_s} \tag{1.27}$$

Przyjmując dalej, że proces jest izotermiczny, a więc gęstość tworzywa $\rho = \text{const}$, masowe natężenie przepływu (wydajność masowa) można określić zależnością

$$\dot{G}_z = \dot{W}_z\,\rho \tag{1.28}$$

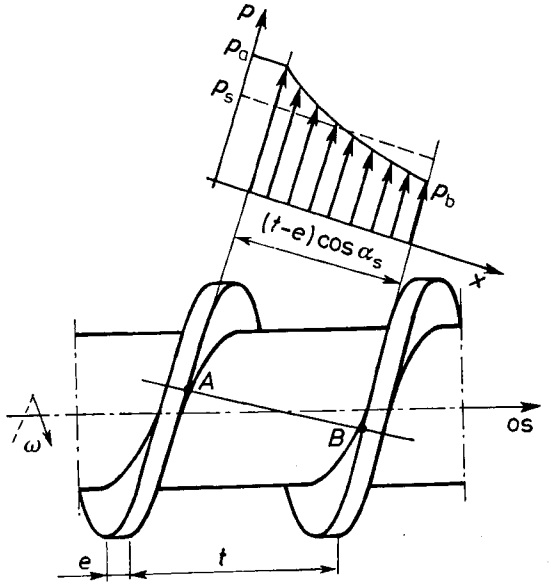
Rzeczywiste natężenia przepływu (wydajności) można wyznaczyć mnożąc wzory (1.27) i (1.28) przez współczynnik uwzględniający zastosowane uproszczenia. Wartość tego współczynnika na ogół jest zawarta w granicach $0{,}8 \div 0{,}95$ [1.53]. Charakter wpływu kąta kierunku ruchu tworzywa na masowe natężenie przepływu przedstawiono na rys. 1.32.



Rys. 1.32. Zależność masowego natężenia przepływu tworzywa $\dot{G}_z$ (wydajności masowej) strefy zasilania od kąta φ_s kierunku ruchu tworzywa [1.15]

Podczas ruchu tworzywa występuje jego tarcie o powierzchnię cylindra, charakteryzowane współczynnikiem tarcia μ_c. Ono to w głównej mierze jest przyczyną zmiany ciśnienia tworzywa w przekroju poprzecznym kanału, czyli na długości skoku. Przy tej powierzchni zwoju ślimaka, która w czasie ruchu naciera na tworzywo, zwanej *powierzchnią czynną* (aktywną), panuje ciśnienie p_a, natomiast przy powierzchni

przeciwległej — *biernej* — ciśnienie p_b ($p_a > p_b$). Przyjmując, że tworzywo jest nieściśliwe, a ciśnienie w nim panujące przenosi się izotropowo we wszystkich kierunkach, ciśnienie w dowolnym miejscu można wyznaczyć z zależności (rys. 1.33)



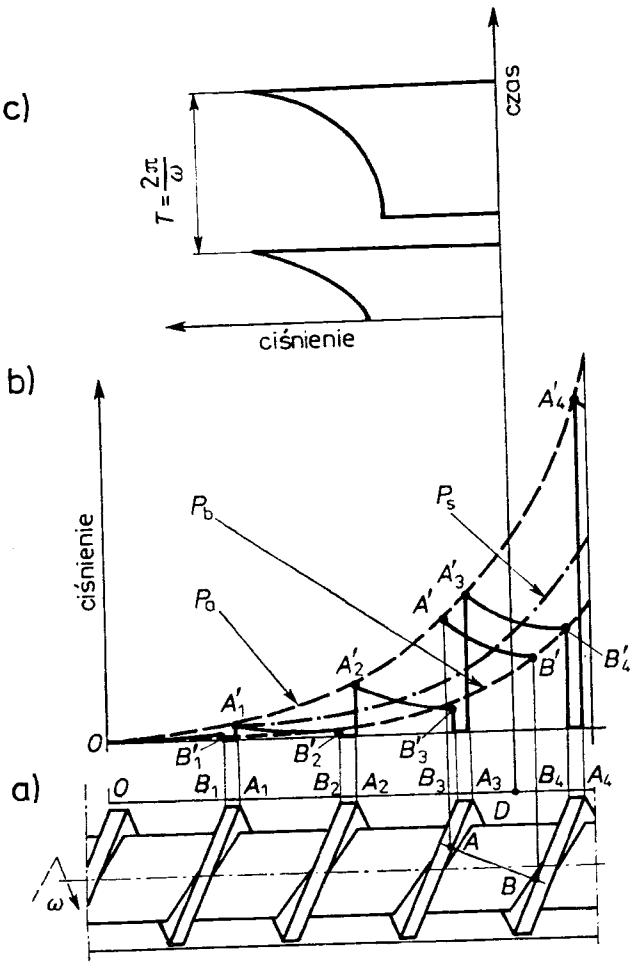
Rys. 1.33. Rozkład ciśnienia tworzywa w przekroju poprzecznym kanału w strefie zasilania (na długości skoku); oznaczenia w tekście

$$p = p_a \exp\left[- \mu_c \frac{D x}{h D_s} \frac{(\cos \varphi_s + \gamma_s \sin \varphi_s)}{\sqrt{1 + \gamma_s^2}} \right] \tag{1.29}$$

Wartość ciśnienia na biernej powierzchni zwoju ślimaka otrzymuje się podstawiając do tego wzoru $x = (t - e)\cos\alpha_s$. Dla wymuszenia ruchu tworzywa nie jest istotne ciśnienie p_a lub ciśnienie p_b, lecz ciśnienie średnie całkowe

$$p_s = \frac{\int_0^{(t-e)\cos\alpha_s} p\,dx}{(t - e)\cos\alpha_s} \tag{1.30}$$

Na długości strefy zasilania ciśnienie tworzywa narasta monotonicznie wzdłuż zwoju ślimaka. Na przykład na powierzchni czynnej ciśnienie narasta według linii przerywanej oznaczonej na rys. 1.34b literami A', a na powierzchni biernej — literami B'. Opisany wzorem (1.29) wykładniczy rozkład ciśnienia w przekroju AB kanału (rys. 1.34a) przedstawia linia $A'B'$ na rys. 1.34b. Dla chwilowego, np. przedstawionego na rys. 1.34b, położenia ślimaka rozkład ciśnienia w cylindrze, np. wzdłuż tworzącej $OB_1A_1B_2A_2\ldots$ wyznacza linia ciągła $OB'_1A'_1B'_2A'_2\ldots$ na rys. 1.34b. Rozkład tego ciśnienia wynika z charakteru jego narastania odpowiednio wzdłuż czynnej i biernej powierzchni zwoju, z przebiegu ciśnienia na długości skoku i z zerowania wartości ciśnienia w miejscach, pod którymi znajduje się grzbiet zwoju. Mierząc ciśnienie w określonym miejscu D cylindra, w czasie obracania się ślimaka, można zaobserwować pulsację ciśnienia (rys. 1.34c). Czas cyklu pulsacji zależy od prędkości kątowej ślimaka. Narastanie ciśnienia wynika z tego, że w trakcie obrotu ślimaka do punktu



Rys. 1.34. Ciśnienie tworzywa na długości strefy zasilania: a) szkic strefy zasilania, b) rozkład ciśnienia, c) pulsacja ciśnienia w miejscu D cylindra; oznaczenia w tekście

pomiarowego zbliża się czynna powierzchnia zwoju. W czasie, gdy pod punktem pomiarowym przechodzi grzbiet zwoju, mierzone ciśnienie spada teoretycznie do zera.

Jeżeli całkowita długość cylindra strefy zasilania wynosi L_c, to ciśnienie średnie p_s na dowolnej długości l_c cylindra można wyznaczyć z zależności [1.15]

$$p_s = p_k \exp\left\{-\left[\left(\frac{\operatorname{tg}\varphi_s - \gamma_s}{1+\gamma_s \operatorname{tg}\varphi_s} - \mu_{sl}\right)\frac{1+\gamma_s^2}{\gamma_s^2}\,\frac{L_c - l_c}{\pi k D_s}\right]\right\} \tag{1.31}$$

w której

$$k = \frac{p_s}{p_a} \tag{1.32}$$

przy czym p_k oznacza ciśnienie na końcu strefy, μ_{sl} zaś — współczynnik tarcia tworzywa o powierzchnie ślimaka (rdzeń i zwoje). Z postaci tego wzoru wynika, że na początku strefy zasilania, gdy $l_c = 0$, musi wystąpić pewne ciśnienie (ponad ciśnienie atmosferyczne); jest nim ciśnienie p_z wytworzone w zasobniku, określone wzorami (1.11) i (1.15). Znając wartość tego ciśnienia można wyznaczyć ciśnienie p_k

$$p_k = p_z \exp\left\{\left[\frac{\operatorname{tg}\varphi_s - \gamma_s}{1+\gamma_s \operatorname{tg}\varphi_s}\,\frac{1-w}{k} - \mu_{sl}\left(\frac{1+w}{k} + \frac{\pi D_r \gamma_s}{h\sqrt{1+\gamma_s^2}}\right)\right]\frac{1+\gamma_s^2}{\gamma_s^2}\,\frac{L_c}{\pi D_s}\right\} \tag{1.33}$$

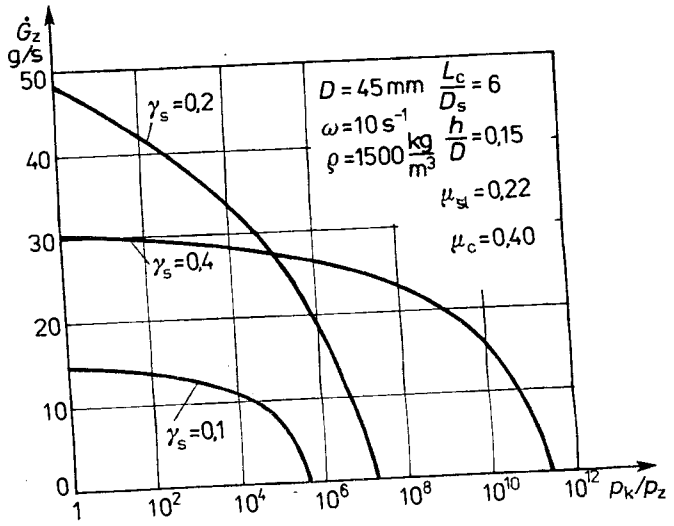
gdzie

$$w = \frac{p_b}{p_a} \tag{1.34}$$

Pomiędzy współczynnikami k oraz w istnieje następująca zależność:

$$k = \frac{1 - w}{\ln \frac{1}{w}} \tag{1.35}$$

Na podstawie podanych dotąd wiadomości można zauważyć, że podczas transportowania tworzywa przez strefę zasilania bez dławienia uzyskuje się największe natężenie przepływu (najmniejszy tangens kąta kierunku ruchu), zależne od współczynników tarcia oraz stromości [1.16]. Przy małym dławieniu następuje nieznaczne zmniejszenie natężenia przepływu, natomiast wzrost kąta kierunku ruchu następuje podczas zwiększania dławienia; zachodzi gwałtowne załamanie się charakterystyki. Kąt kierunku ruchu zaczyna szybko rosnąć (intensywny ruch obrotowy przy małym ruchu osiowym), dążąc do bardzo dużych wartości, czyli natężenie przepływu dąży do zera. Następuje to dla największego, możliwego do wytworzenia ciśnienia w strefie zasilania. Na rysunku 1.35 przedstawiono przykładowo zależność $\dot{G}_z = f(p_k/p_z)$ dla różnych wartości γ_s, potwierdzającą podane rozumowanie. Krzywe na rysunku nazywa się *charakterystykami strefy zasilania.*



Rys. 1.35. Charakterystyki strefy zasilania (przykład) [1.15]

Siła całkowita działająca na czynną powierzchnię zwoju ślimaka jest określona zależnością

$$P_a = \int_0^{L_s} p_a h \, dl_s \tag{1.36}$$

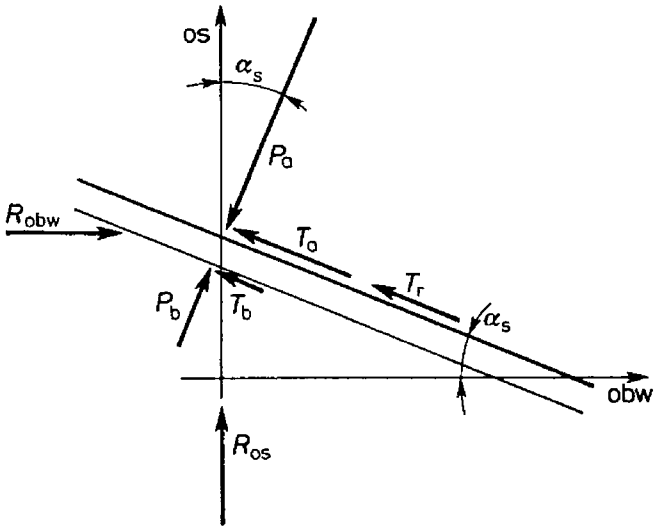
a na powierzchnię bierną

$$P_b = \int_0^{L_s} p_b h \, dl_s \tag{1.37}$$

gdzie l_s oznacza dowolną długość linii śrubowej ślimaka, przy czym

$$l_s = \frac{l_c}{\sin \alpha_s} = l_c \frac{\sqrt{1+\gamma_s^2}}{\gamma_s} \tag{1.38}$$

Oddziaływanie tworzywa na ślimak musi być równoważone zewnętrznie siłą o składowej osiowej R_{os} i obwodowej R_{obw}. Składowa osiowa jest przejmowana przez ułożyskowanie ślimaka. Aby ją wyznaczyć, należy rozwiązać równanie rzutu sił działających na ślimak na kierunek osiowy (rys. 1.36)



Rys. 1.36. Układ sił działających na ślimak

$$R_{os} = (P_a - P_b)\cos \alpha_s - (T_a + T_b + T_r)\sin \alpha_s \tag{1.39}$$

gdzie T_a oznacza siłę tarcia wynikającą z siły normalnej P_a, T_b — podobnie, lecz dotyczy siły normalnej P_b, T_r — siłę tarcia tworzywa o rdzeń ślimaka. Po wykonaniu działań i uproszczeniu polegającym na pominięciu wyrażenia o bardzo małej wartości (błąd z tego powodu nie przekracza 2% [1.15]), otrzymuje się

$$R_{os} = \frac{p_k L_c h}{\gamma_s k \ln \frac{p_k}{p_z}} \left[1 - \mu_{sl}\gamma_s\left(1 + \frac{D_r}{h}\frac{\pi k \gamma_s}{\sqrt{1+\gamma_s^2}}\right)\right] \tag{1.40}$$

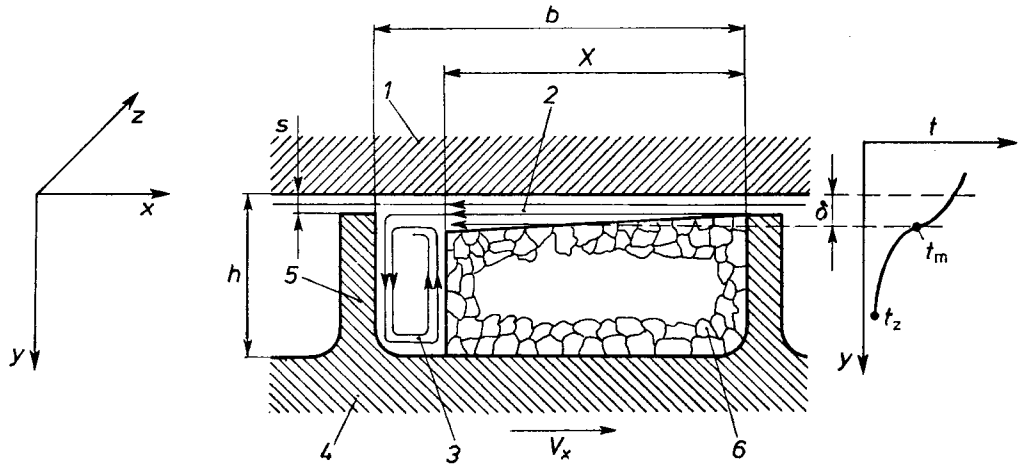
Podobnie wyprowadza się wzór na siłę obwodową R_{obw}, natomiast moment obrotowy ślimaka określa zależność

$$M = \frac{p_k L_c h D_s}{2\gamma_s k \ln \frac{p_k}{p_z}} \left[\gamma_s + \mu_{sl}\left(1 + \frac{D_r}{h}\frac{\pi k \gamma_s}{\sqrt{1+\gamma_s^2}}\right)\right] \tag{1.41}$$

Z powodu podobnego uproszczenia błąd nie przekracza 5%. Ze względu na określoną dokładność wykonania i montażu ślimaka oraz cylindra, luz może lokalnie przybierać bardzo małe wartości lub nawet $s<0$, co powoduje tarcie grzbietu zwoju o cylinder, czego nie uwzględnia wzór (1.41). Postępując konwencjonalnie można do tego wzoru wprowadzić współczynnik poprawkowy większy od jedności.

1.4.2. Strefa przemiany

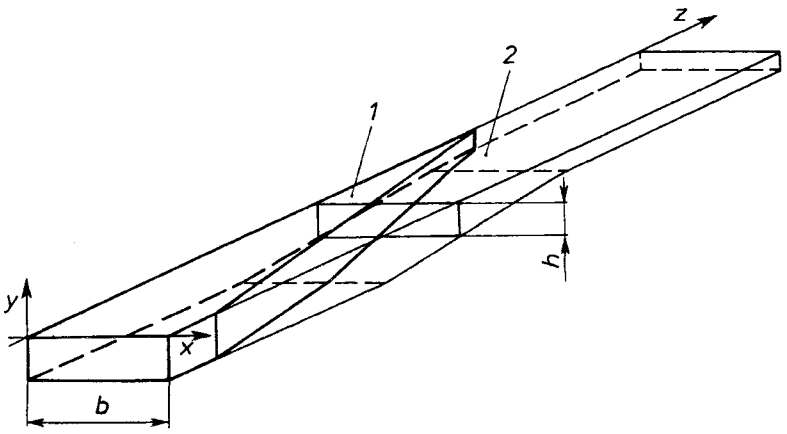
Z analizy dostępnej literatury wynika, że jedną z pierwszych poważniejszych prac poświęconych strefie przemiany (sprężania) jest publikacja Z. Tadmora z 1966 r. [1.96], rozwijającego twórczo myśli B. Maddocka z 1959 r. [1.47]. Model Z. Tadmora był wielokrotnie poprawiany [1.8, 1.24] również przez samego autora [1.97, 1.99]. Wykazano też [1.23, 1.36], że modelowy proces uplastyczniania zachodzi szybciej niż rzeczywisty, wymagający dłuższej strefy oraz wskazano [1.72, 1.90] możliwość wpływu elementów geometrycznych ślimaka i warunków uplastyczniania na intensywność procesu. Z polskich prac na wyróżnienie zasługują prace E. Łobockiego [1.45, 1.46], R. Stellera i współpracowników [1.91, 1.92, 1.93] oraz K. Wilczyńskiego [1.106, 1.109].



Rys. 1.37. Zachowanie się tworzywa w strefie przemiany w przekroju poprzecznym kanału według Tadmora i zmienność temperatury t tworzywa wzdłuż współrzędnej y prostopadłej do powierzchni walcowych cylindra i ślimaka: *1* — cylinder, *2* — warstwa plastycznego lub ciekłego tworzywa (III), *3* — obszar przepływu poprzecznego tworzywa w stanie plastycznym lub ciekłym (II), *4* — ślimak, *5* — zwój ślimaka, *6* — tworzywo w stanie stałym (I), t_m — temperatura mięknienia, t_z — temperatura zeszklenia, V_x — składowa prędkości obwodowej ślimaka; pozostałe oznaczenia w tekście

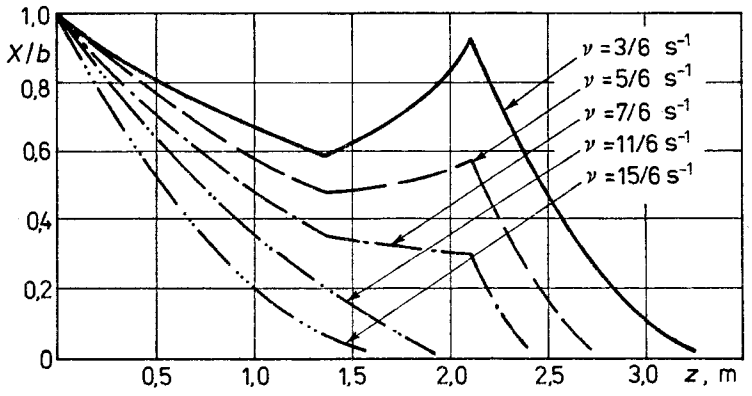
Przejście tworzywa ze stanu stałego w stan plastyczny, rozpatrywane modelowo w przekroju poprzecznym kanału ślimaka (rys. 1.37), rozpoczyna się, gdy temperatura ścianki cylindra staje się wyższa od temperatury mięknienia tworzywa. Na powierzchni styku tworzywa ze ścianką cylindra zachodzi najpierw aglomeracja ziarn tworzywa, a następnie tworzy się cienka warstwa tworzywa plastycznego, której grubość powiększa się w miarę przemieszczania przez strefę. Przyjmuje się, że związana jest ona adsorpcyjnie z powierzchnią ścianki. Zła przewodność cieplna nie pozwala na szybkie zwiększanie się grubości warstwy. Z chwilą, gdy warstwa ta osiągnie grubość większą niż wartość luzu s, zostaje w tej części zbierana przez krawędź powierzchni czynnej i grzbietu zwoju, gromadząc się na aktywnej powierzchni zwoju i wykonując ruch obrotowy — przepływ poprzeczny. W trakcie przemieszczania się tworzywa przez strefę może zacząć pojawiać się i powiększać warstwa tworzywa w stanie stopionym, co odbywa się według podobnego mechanizmu. Mimo że uplastycznianie zachodzi głównie od strony cylindra, w miarę postępu procesu zmniejszaniu aż do zera ulega nie wysokość obszaru tworzywa w stanie

stałym, lecz przede wszystkim jego szerokość X. Na rysunku 1.38 pokazano rozwinięcie kanału ślimaka z zaznaczeniem tworzywa w stanie stałym i tworzywa w stanie plastycznym.



Rys. 1.38. Schemat rozwinięcia kanału ślimaka: *1* — tworzywo w stanie stałym (I), *2* — tworzywo w stanie plastycznym lub ciekłym (II)

Przebieg procesu uplastyczniania bywa charakteryzowany ogólnie rozkładem względnej szerokości X/b obszaru I tworzywa w stanie stałym (rys. 1.37) w kierunku długości kanału ślimaka w zależności od różnych czynników (rys. 1.39).



Rys. 1.39. Wpływ prędkości obrotowej ν ślimaka na rozkład względnej szerokości obszaru tworzywa w stanie stałym X/b w kierunku długości z kanału ślimaka: rodzaj tworzywa PE-HD, $D = 60$ mm, $t = 60$ mm, $e = 7$ mm, $G_s = 100$ g/s [1.109]

Jak podano w p. 1.2.1 i 1.2.2, jedną z wielkości charakteryzujących ślimak jest redukcja objętości kanału ślimaka (dawniej zwana stopniem sprężania), którą najlepiej realizuje się poprzez zmniejszanie głębokości h kanału, czyli wysokości zwoju ślimaka. Aby to zmniejszanie wyznaczyć, należy odstąpić od założenia podanego w p. 1.4.1, że tworzywo jest nieściśliwe, i przyjąć realnie, iż jego ściśliwość w strefie zasilania można określić za pomocą współczynnika względnego zmniejszenia objętości

$$\beta = \frac{V_0 - V}{V_0} \tag{1.42}$$

Tablica 1.3

Stałe c oraz u we wzorach (1.43) i (1.46) przy $p_0 = 10$ MPa [1.17]

Rodzaj tworzywa	Wartości stałych	
	c	u
PE-LD	$7{,}1 \cdot 10^{-6}$	6
PMMA	$8{,}8 \cdot 10^{-9}$	9

Wartości β zależą przede wszystkim od rodzaju tworzywa, ciśnienia oraz temperatury i mogą być przybliżane funkcją

$$\beta = c\left(\lg \frac{p}{p_0}\right)^u \tag{1.43}$$

przy czym stałe c i u dla PE - LD i PMMA, wyznaczone doświadczalnie, są zestawione w tabl. 1.3. Graniczne zmniejszenie objętości wynika z możliwości ściśnięcia rozluźnionego tworzywa wejściowego znajdującego się w strefie zasypu, charakteryzowanego gęstością nasypową ρ_n, do gęstości ρ tworzywa litego, a więc

$$\beta_g = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{\frac{m}{\rho_n} - \frac{m}{\rho}}{\frac{m}{\rho}} = \frac{\rho - \rho_n}{\rho} \tag{1.44}$$

W celu umożliwienia generowania ciśnienia w kanale, czyli aby tworzywo mogło znajdować się pod coraz większym ciśnieniem, musi następować jego zagęszczanie, stosownie do ciśnienia w danym miejscu. Przyjmując, że zmniejszanie objętości tworzywa jest kompensowane redukcją objętości kanału, realizowaną zmniejszeniem się jego głębokości h, wzór (1.42) można zapisać następująco:

$$\beta = \frac{h_0 - h}{h_0} \tag{1.45}$$

Głębokość h kanału w strefie zasilania w dowolnej odległości l od cylindra można wyrazić według J. Diakuna [1.15, 1.17] wzorem

$$h = h_d \frac{\rho}{\rho_n}\left[1 - c\left(\frac{l}{L} \lg \frac{p_k}{p_z}\right)^u\right] \tag{1.46}$$

w którym h_d oznacza głębokość kanału na końcu strefy przemiany, w strefie dozowania. Na początku strefy zasilania $l = 0$, co powoduje

$$h_0 = h_d \frac{\rho}{\rho_n} \tag{1.47}$$

W strefach przemiany i dozowania objętość tworzywa zmienia się zgodnie z cieplnym równaniem stanu. Przyjmuje się zatem, że między głębokościami h_1 i h_2 kanału, w dowolnych miejscach 1 oraz 2, gdzie tworzywo ma gęstość odpowiednio $\rho_1(p, t)$ i $\rho_2(p, t)$, zachodzi związek

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2(p,\ t)}{\rho_1(p,\ t)} \tag{1.48}$$

Masowe natężenie przepływu $\dot{G}$ tworzywa w strefie przemiany jest sumą natężeń przepływów w trzech obszarach w stanach: stałym $\dot{G}_{\mathrm{I}}$, plastycznym lub ciekłym $\dot{G}_{\mathrm{II}}$ oraz plastycznym lub ciekłym $\dot{G}_{\mathrm{III}}$

$$\dot{G} = \dot{G}_{\mathrm{I}} + \dot{G}_{\mathrm{II}} + \dot{G}_{\mathrm{III}} \tag{1.49}$$

Tworzywo w obszarze I w stanie stałym ma kształt „klina" (rys. 1.38). Przyjmuje się za Z. Tadmorem [1.99], że prędkość przemieszczania się „klina" w płaszczyźnie y–z jest stała na długości strefy przemiany i można ją wyznaczyć na podstawie warunków na wejściu do tej strefy, gdzie cały przekrój poprzeczny kanału jest wypełniony tworzywem o gęstości ρ i przemieszcza się ze średnią prędkością V_{zp}

$$V_{\mathrm{zp}} = \frac{\dot{G}}{h\,b\,\rho} \tag{1.50}$$

Zatem

$$\dot{G}_{\mathrm{I}} = V_{\mathrm{zp}}\, X\,(h-\delta)\,\rho = \dot{G}\,\frac{X(h-\delta)}{h\,b} \tag{1.51}$$

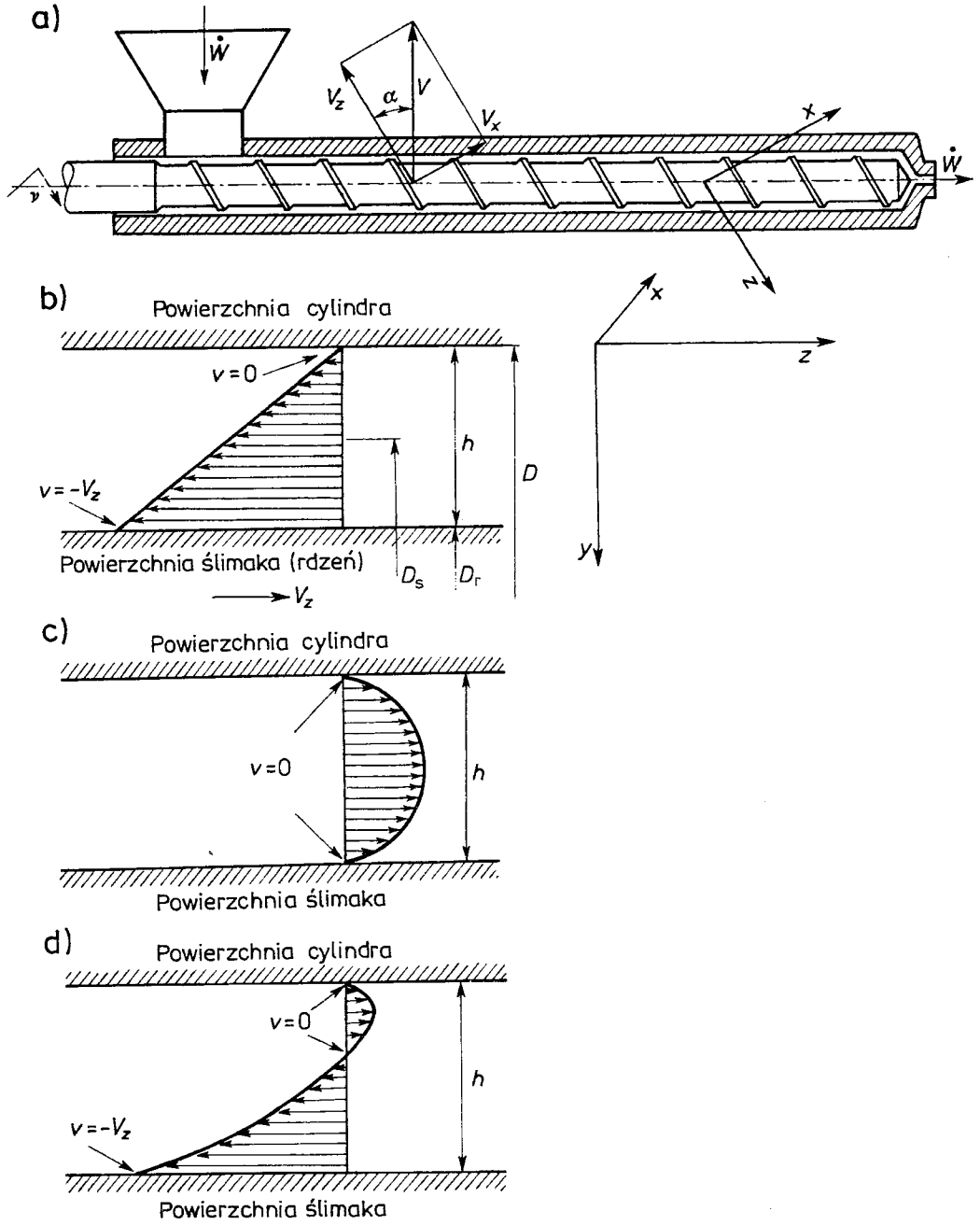
gdzie wielkości geometryczne X, h, b oraz δ są pokazane na rysunku 1.37. Aby korzystać z zależności [1.51], należy najpierw obliczyć wielkości X oraz δ; można tego dokonać na podstawie teorii uplastyczniania dynamicznego, rozwiązując układ trzech równań [1.97, 1.99]. W przypadku wtryskiwania, obliczenia X oraz δ są o wiele bardziej skomplikowane, gdyż tworzywo uplastycznia się zarówno wówczas, gdy ślimak się obraca (uplastycznianie dynamiczne), jak i wówczas, gdy ślimak jest nieruchomy (uplastycznianie statyczne), przy czym stan końcowy uplastyczniania przy obracającym się ślimaku jest stanem początkowym uplastyczniania przy nieruchomym ślimaku i odwrotnie.

Przepływ tworzywa w obszarze II w stanie plastycznym lub ciekłym jest w istocie przepływem ścinającym płynu w szczelinie. Jego analiza przy założeniu, że płyn spełnia model potęgowy, jest dość złożona; można ją znaleźć w pracach R. Stellera [1.91, 1.93]. Przepływ tworzywa w obszarze III w stanie plastycznym lub ciekłym jest w istocie przepływem obrotowym (cyrkulacyjnym). Jego analiza jest również dość złożona, a przy identycznym założeniu jej rezultaty zawierają także prace R. Stellera [1.93].

1.4.3. Strefa dozowania

Strefie dozowania poświęca się w literaturze stosunkowo najwięcej miejsca. Jako klasyczną przyjmuje się uproszczoną teorię przepływu tworzywa w kanale tej strefy, opublikowaną w latach 1951 ÷ 57 przez J.F. Carleya, D. Finlaysona, J.M. McKelveya, Ch. Maillefera, W. Meskata, R.A. Strauba i H.S. Rowella [1.21, 1.26, 1.51, 1.67]. Przyjmuje się w niej, że tworzywo w stanie plastycznym lub ciekłym jest płynem niutonowskim, a przepływ jest izotermiczny i laminarny, odbywający się pod wpływem obracającego się cylindra. Zakłada się dalej, że kanał śrubowy ślimaka

i powierzchnię wewnętrzną cylindra można rozwinąć na płaszczyznę, a stosunek głębokości kanału do jego szerokości jest mały. Teoria ta przez wiele lat była powszechnie akceptowana i przytaczana w różnych publikacjach [1.69, 1.71, 1.111]. W miarę upływu czasu publikowano zmodyfikowane ujęcia, bardziej odpowiadające warunkom rzeczywistym [1.10, 1.40] oraz uwzględniano nieniutonowskie zachowanie się tworzywa i nieizotermiczność; na wyróżnienie zasługują tu prace R. Tornera [1.101], Z. Tadmora i C. Gogosa [1.97], H. Kühnle [1.42] oraz praca zbiorowa pod redakcją N. Basowa i W. Broja [1.100]. Z prac wykonanych w Polsce należy wymienić publikacje B. Łączyńskiego [1.44], B. Bębenka i R. Stępnia [1.6].



Rys. 1.40. Rozkłady prędkości odniesione do nieruchomego cylindra: a) ślimaka, b), c) oraz d) tworzywa w przekroju wzdłużnym kanału ślimaka w procesie izotermicznym; b) przepływu wleczonego, c) przepływu ciśnieniowego, d) przepływu wzdłużnego (wypadkowego)

Prędkość obwodową V ślimaka rozkłada się na dwie składowe prędkości: składową V_z w kierunku równoległym do linii śrubowej zwoju oraz V_x w kierunku prostopadłym do linii śrubowej (rys. 1.40a), pokazaną również na rys. 1.37. Składowa V_z działająca w płaszczyźnie $y-z$ jest skierowana przeciwnie do ruchu tworzywa z prędkością v w kanale śrubowym w tej płaszczyźnie.

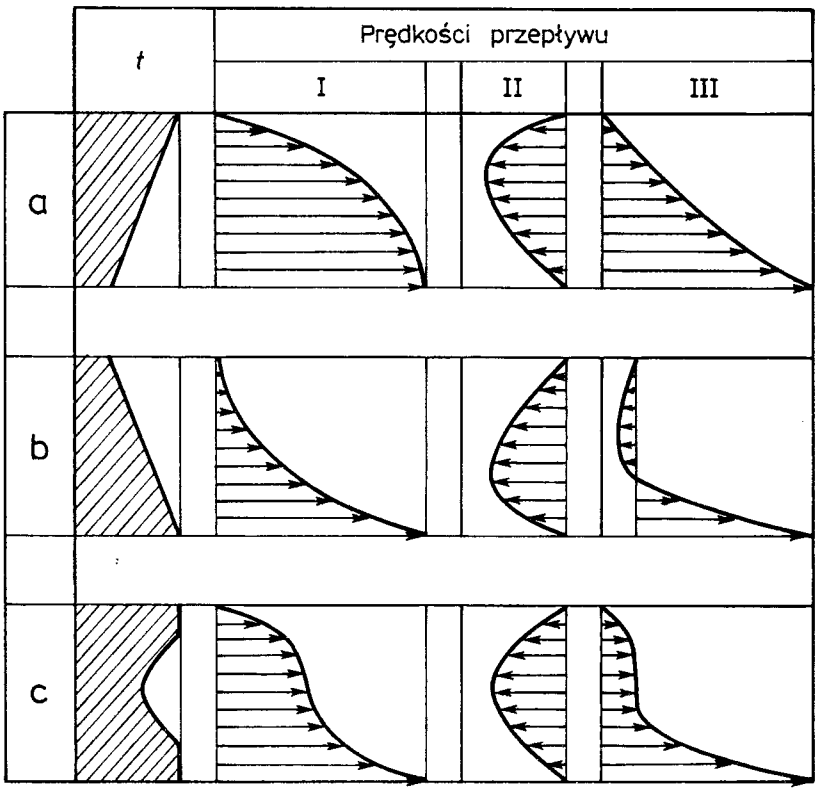
Do analitycznego opisu ruchu tworzywa w płaszczyźnie $y-z$, przy podanych poprzednio założeniach, można zastosować równanie różniczkowe przepływu Naviera–Stokesa

$$\frac{d^2v}{dy^2} = -\frac{1}{\eta}\left(\frac{dp}{dz}\right) \tag{1.52}$$

w którym y jest odległością w kierunku głębokości kanału (na powierzchni cylindra $y = 0$), z — odległością wzdłuż zwoju ślimaka, rosnącą w kierunku narzędzia, v — prędkością wzdłużną tworzywa w dowolnym punkcie przekroju poprzecznego kanału, dp/dz — gradientem ciśnienia wzdłuż zwoju; znak minus oznacza, że przepływ odbywa się w kierunku przeciwnym do wektora gradientu ciśnienia, η — lepkością dynamiczną tworzywa; zakładając $\eta = \text{const}$ przyjmuje się, że płyn jest niutonowski i temperatura w kierunku y jest stała. Całkując dwukrotnie tę zależność z uwzględnieniem warunków brzegowych: dla $y = h$, $v = -V_z$ oraz dla $y = 0$, $v = 0$, po kilku prostych przekształceniach, zakładając $dp/dz \neq 0$, otrzymuje się

$$v = \frac{V_z y}{h} + \frac{(y^2 - hy)}{2\eta}\left(\frac{dp}{dz}\right) \tag{1.53}$$

Pierwszy człon z prawej strony tego równania nazywa się *prędkością przepływu wleczonego* v_w, natomiast drugi — *prędkością przepływu ciśnieniowego* v_c. Modelowy rozkład obu prędkości przedstawiono na rys. 1.40b, c, d. W przypadku przepływu nieizotermicznego rozkłady prędkości są inne (rys. 1.41). Gdy przepływ odbywa się



Rys. 1.41. Rozkłady prędkości przepływu wleczonego (I), ciśnieniowego (II) i wzdłużnego (III) w zależności od temperatury t wyższej na powierzchni cylindra (a), wyższej na powierzchni rdzenia ślimaka (b), w przypadku procesu autotermicznego (c)

w kierunku zgodnym z wektorem gradientu ciśnienia, z prawej strony zależności (1.52) zamiast znaku minus wystąpi znak plus, co powoduje podobną zmianę znaku we wzorze (1.53). A więc $v = v_w \pm v_c$.

Aby wyznaczyć objętościowe natężenie przepływu wzdłużnego (wydajność objętościową), należy scałkować iloczyn prędkości v i elementarnej powierzchni $b\,dy$ w granicach głębokości h kanału

$$\dot{W} = \int_0^h v\, b\, dy \tag{1.54}$$

Po podstawieniu do tej zależności wzoru (1.53) i wykonaniu zaznaczonych działań otrzymuje się

$$\dot{W} = \frac{V_z b h}{2} - \frac{b h^3}{12\eta}\left(\frac{dp}{dz}\right) \tag{1.55}$$

Równaniu temu można nadać bardziej dogodną do obliczeń postać, wprowadzając do niego elementy geometryczne ślimaka i jego prędkość obwodową. Z rysunku 1.40 wynika, że

$$V_z = V \cos \alpha_r \simeq \pi D_s v \cos \alpha_s \tag{1.56}$$

natomiast z rys. 1.33

$$b = (t - e) \cos \alpha_s \tag{1.57}$$

a mając na uwadze wzór (1.38) można napisać

$$dz = \frac{dl}{\sin \alpha_s} \tag{1.58}$$

Podstawiając wymienione trzy zależności do wzoru (1.55), otrzymuje się po przekształceniach

$$\dot{W} = \frac{\pi D_s v h (t - e) \cos^2 \alpha_s}{2} - \frac{h^3 (t - e) \cos \alpha_s \sin \alpha_s}{12\eta}\left(\frac{dp}{dl}\right) \tag{1.59}$$

Z rysunku 1.3 widać, że

$$t = \pi D_s \operatorname{tg} \alpha_s \tag{1.60}$$

Podstawiając tę zależność do wzoru (1.59) i pomijając małe wartości e w stosunku do pozostałych wartości, otrzymuje się

$$\dot{W} = \frac{\pi^2 D_s^2 v h \sin \alpha_s \cos \alpha_s}{2} - \frac{\pi D_s h^3 \sin^2 \alpha_s}{12\eta}\left(\frac{dp}{dl}\right) \tag{1.61}$$

Pierwszy człon z prawej strony tego równania jest *objętościowym natężeniem przepływu wleczonego* $\dot{W}_w$, drugi zaś — *objętościowym natężeniem przepływu ciśnieniowego* $\dot{W}_c$. Analogicznie jak przy wyznaczaniu prędkości przepływu $\dot{W} = \dot{W}_w \pm \dot{W}_c$.

Jeżeli wymiary ślimaka na rozpatrywanej długości L_{1-2} strefy dozowania — od punktu 1 do punktu 2 — są stałe i lepkość nie ulega zmianie, to

$$\frac{dp}{dl} = \frac{p_2 - p_1}{L_{1-2}} = \frac{\Delta p}{L} \tag{1.62}$$

Podstawiając tę zależność do wzoru (1.61) uzyskuje się

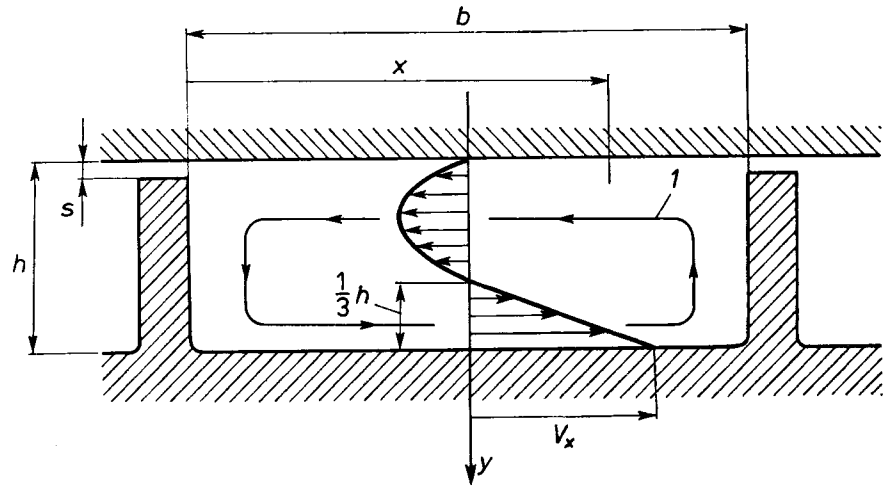
$$\dot{W} = \alpha v - \beta \frac{\Delta p}{\eta} \tag{1.63}$$

gdzie α i β w m^3 są wielkościami zależnymi tylko od elementów geometrycznych ślimaka

$$\alpha = \frac{\pi^2 D_s^2 h \sin \alpha_s \cos \alpha_s}{2} \tag{1.64}$$

$$\beta = \frac{\pi D_s h^3 \sin^2 \alpha_s}{12 L} \tag{1.65}$$

Rozpatrując ruch tworzywa w płaszczyźnie przekroju poprzecznego, czyli w płaszczyźnie $x-y$, należy zauważyć, że warstewka płynu stykająca się bezpośrednio z powierzchnią rdzenia ślimaka (rys. 1.42), ze względu na adsorpcję, ma prędkość V_x (rys. 1.40a)



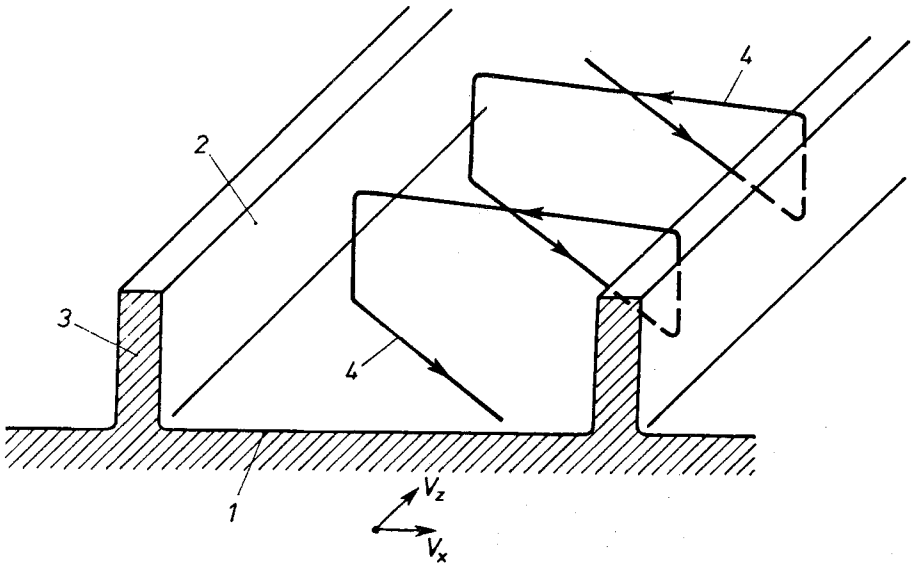
Rys. 1.42. Przepływ poprzeczny tworzywa w kanale ślimaka; *1* — tor ruchu cząstki; pozostałe oznaczenia w tekście

$$V_x = V \sin \alpha_r \simeq \pi D_s v \sin \alpha_s \tag{1.66}$$

a warstewki do niej przylegające, wskutek tarcia wewnętrznego, prędkości coraz mniejsze w miarę oddalania się od niej. Przepływ tej części tworzywa jest przepływem wleczonym. Powierzchnie boczne zwojów są prostopadłe do kierunku tego przepływu i powodują jego zwrot o $(\pi/2)$ rad i następnie znowu zwrot o $(\pi/2)$ rad. Zatem

przeciwległa część tworzywa przepływa w kierunku przeciwnym, ale jest to już przepływ ciśnieniowy. Oba przepływy ujęte łącznie tworzą *przepływ poprzeczny*. Przepływ ten nie wpływa na natężenie przepływu w układzie jednoślimakowym (wydajność), lecz głównie powoduje mieszanie tworzywa.

Przepływ wzdłużny (wleczony i ciśnieniowy) oraz przepływ poprzeczny (również wleczony i ciśnieniowy) tworzą łącznie przepływ całkowity w kanale ślimaka; jest to przepływ po linii śrubowej niekołowej i nieregularnej. W zależności od położenia cząstki w kanale linie śrubowe przepływu — tory ruchu — są inne. Na rysunku 1.43 przedstawiono tor ruchu cząstki w przepływie całkowitym odpowiadający torowi na rys. 1.42.



Rys. 1.43. Schematyczne przedstawienie przepływu całkowitego w kanale ślimaka: *1* — powierzchnia rdzenia ślimaka, *2* — powierzchnia czynna zwoju, *3* — zwój ślimaka, *4* — tor ruchu cząstki

Do analitycznego opisu ruchu tworzywa w płaszczyźnie $x-y$ w pewnym oddaleniu od powierzchni bocznych zwojów można zastosować, podobnie jak poprzednio, równanie różniczkowe przepływu Naviera–Stokesa, które w tym przypadku ma postać

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} = \eta \frac{\mathrm{d}^2 V_x}{\mathrm{d}y^2} \tag{1.67}$$

Natężenie przepływu przypadające na jednostkową szerokość kanału jest równe zeru (rys. 1.42), co można zapisać następująco [1.18]:

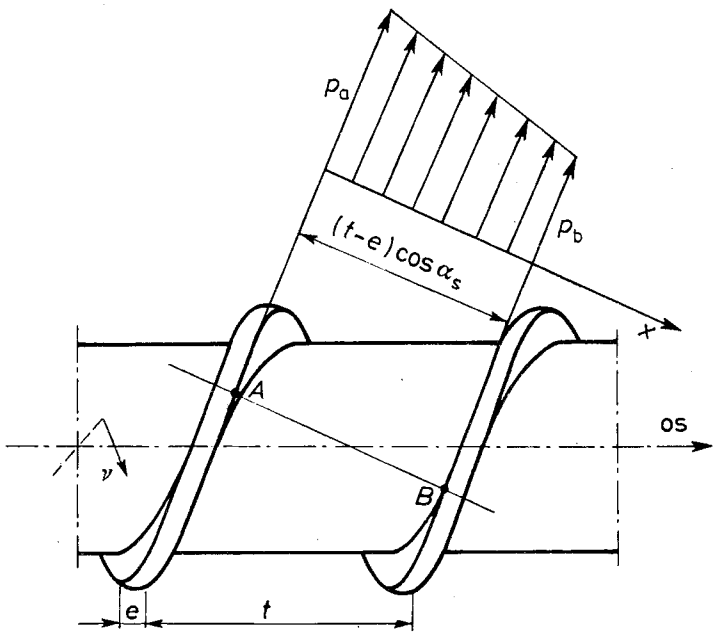
$$\int_0^h V_x \mathrm{d}y = 0 \tag{1.68}$$

Biorąc to pod uwagę oraz zakładając $\eta = \text{const}$, co oznacza przyjęcie, że płyn jest niutonowski i temperatura jest stała w kierunku x, rozwiązanie równania (1.67) można napisać w postaci

$$p = p_a - 6\pi v \eta \frac{D}{h^2} x \sin \alpha_s \tag{1.69}$$

gdzie p_a jest ciśnieniem panującym przy czynnej powierzchni zwoju ślimaka. Wyrażenie (1.69) określa liniowy spadek ciśnienia w przekroju poprzecznym kanału (na długości skoku) (rys. 1.44). Na biernej powierzchni zwoju, gdzie $x = (t - e) \cos \alpha_s$, ciśnienie wynosi

$$p_b = p_a - 3\pi v \eta \frac{D(t-e)}{h^2} \sin 2\alpha_s \tag{1.70}$$



Rys. 1.44. Rozkład ciśnienia tworzywa w przekroju poprzecznym kanału w strefie dozowania (na długości skoku); oznaczenia w tekście

Z równania tego wynika, że na długości kanału różnica ciśnień wywieranych na czynną i bierną powierzchnię zwoju ma również wartość stałą.

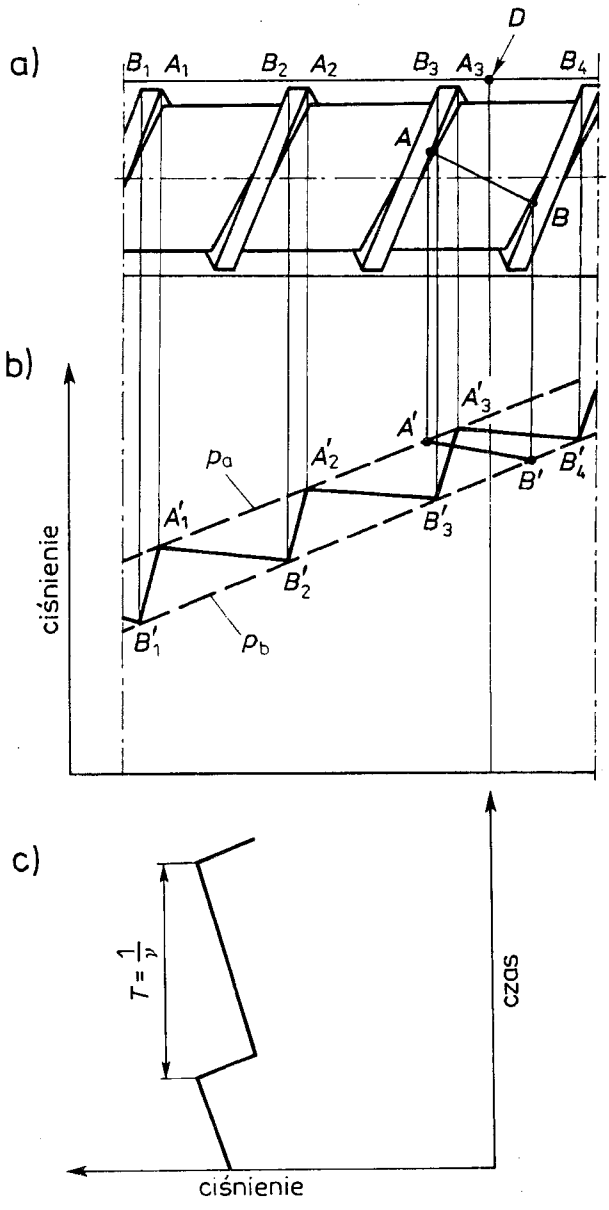
Podobnie jak w przypadku strefy zasilania (p. 1.4.1), operuje się również pojęciem ciśnienia średniego, które definiuje się wzorem (1.30).

Na długości strefy dozowania ciśnienie tworzywa narasta liniowo wzdłuż zwoju ślimaka. Przykładowo na powierzchni czynnej ciśnienie narasta według linii przerywanej oznaczonej na rys. 1.45b literami *A*, a na powierzchni biernej — literami *B*. Dalsze rozumowanie jest analogiczne, jak dla strefy zasilania (p. 1.4.1). Należy zauważyć, że pulsacja ciśnienia w strefie dozowania jest mniej intensywna niż w strefie zasilania, gdyż podczas przechodzenia pod punktem pomiarowym grzbietu zwoju w strefie dozowania następuje spadek ciśnienia nie do zera (rys. 1.34), lecz do wartości przy biernej powierzchni w danym przekroju.

W szczelinie pomiędzy grzbietem zwoju a powierzchnią wewnętrzną cylindra (rys. 1.2) występuje przepływ tworzywa spowodowany różnicą ciśnień panujących na czynnej i biernej powierzchni zwoju. Jest to więc przepływ ciśnieniowy przez kanał o wymiarach: wysokość s, szerokość $\pi D_s / \cos \alpha_s$ oraz długość $e \cos \alpha_s$. Objętościowe natężenie przepływu ciśnieniowego można opisać zależnością identyczną jak ta, która określa natężenie w płaszczyźnie $y-z$ w kanale ślimaka [drugi człon z prawej strony (1.61)]: jest ono wprost proporcjonalne do szerokości i trzeciej potęgi wysokości, a odwrotnie proporcjonalne do długości kanału, zatem

$$\dot{W}_s = \frac{\pi D_s s^3 \Delta p'}{12 \eta e \cos^2 \alpha_s} E \tag{1.71}$$

gdzie $\Delta p'$ oznacza spadek ciśnienia, liczony względem obu stron zwoju, E zaś — współczynnik uwzględniający dokładność wykonania i montażu ślimaka oraz cylindra.



Rys. 1.45. Ciśnienie tworzywa na długości strefy dozowania: a) szkic strefy dozowania, b) rozkład ciśnienia, c) pulsacja ciśnienia w miejscu D cylindra; oznaczenia w tekście

Spadek ciśnienia $\Delta p'$ można wyrazić wzorem

$$\Delta p' = \frac{\pi D_s \operatorname{tg} \alpha_s \cos^2 \alpha_s \Delta p}{L} \tag{1.72}$$

Podstawiając tę zależność do wzoru (1.71) oraz przyjmując $E = 1{,}2$, otrzymuje się

$$\dot{W}_s = \frac{\pi^2 D_s^2 s^3 \operatorname{tg} \alpha_s}{10 L e} \frac{\Delta p}{\eta} \tag{1.73}$$

Można teraz zapisać ogólny wzór na objętościowe natężenie przepływu tworzywa w układzie jednoślimakowym w postaci

$$\dot{W} = \dot{W}_w \pm \dot{W}_c - \dot{W}_s \tag{1.74}$$

czyli

$$\dot{W} = \frac{\pi^2 D_s^2 v h \sin \alpha_s \cos \alpha_s}{2} \pm \frac{\pi D_s h^3 \sin^2 \alpha_s}{12 L} \frac{\Delta p}{\eta} - \frac{\pi^2 D_s^2 s^3 \operatorname{tg} \alpha_s}{10 L e} \frac{\Delta p}{\eta} \tag{1.75}$$

lub uwzględniając zależności (1.64) i (1.65) oraz

$$\gamma = \frac{\pi^2 D_s^2 s^3 \operatorname{tg} \alpha_s}{10 L e} \tag{1.76}$$

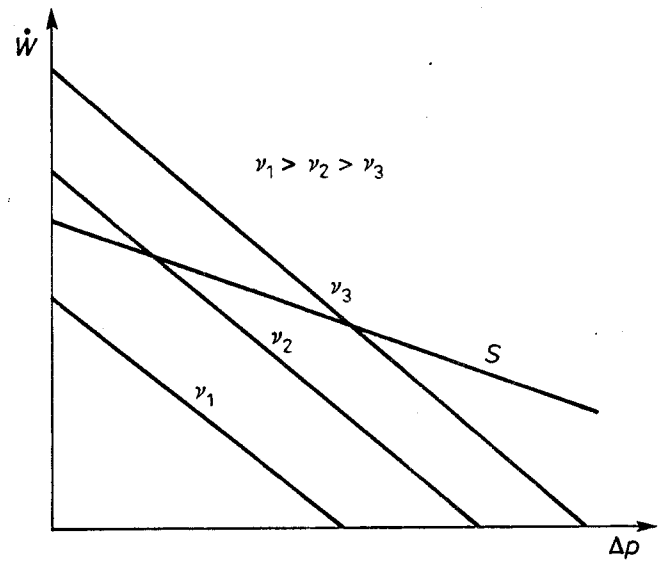
w postaci

$$\dot{W} = \alpha v \pm \beta \frac{\Delta p}{\eta} - \gamma \frac{\Delta p}{\eta} \tag{1.77}$$

lub też przyjmując najczęstszy przypadek $\dot{W}_c$ ze znakiem ujemnym

$$\dot{W} = \alpha v - (\beta + \gamma) \frac{\Delta p}{\eta} \tag{1.78}$$

Równanie to w układzie współrzędnych: objętościowe natężenie przepływu w układzie jednoślimakowym–spadek ciśnienia, przedstawia linię prostą o ujemnym współczynniku kątowym, która stanowi *charakterystykę strefy dozowania* (dawniej nazywaną nieściśle charakterystyką ślimaka). Dla różnych wartości prędkości obrotowych v tego samego ślimaka i cylindra otrzymuje się linie równoległe do siebie, co pokazano na rys. 1.46.



Rys. 1.46. Charakterystyki: danej strefy dozowania dla różnych wartości prędkości obrotowej v tego samego ślimaka oraz innego ślimaka S o płytszym kanale w strefie dozowania

Moc napędu ślimaka składa się z [1.10, 1.67]:

— mocy $\dot{N}_1$ rozpraszanej w kanale ślimaka

$$\dot{N}_1 = \frac{\pi^3 D_s^3 v^2 L \eta}{h} [(1 + 3a^2) \cos^2 \alpha_s + 4 \sin^2 \alpha_s] \tag{1.79}$$

gdzie

$$a = \pm \frac{\dot{W}_c}{\dot{W}_w} \tag{1.79a}$$

— mocy $\dot{N}_2$ niezbędnej do pokonania oporów przepływu

$$\dot{N}_2 = \dot{W} \Delta p \tag{1.80}$$

— mocy $\dot{N}_3$ rozpraszanej w szczelinie pomiędzy grzbietem zwoju a powierzchnią wewnętrzną cylindra

$$\dot{N}_3 = \frac{\pi^2 D_s^2 v^2 L \eta}{s \operatorname{tg} \alpha_s} \tag{1.81}$$

Moc $\dot{N}_d$ napędu ślimaka w strefie dozowania jest sumą wymienionych mocy składowych, zatem

$$\dot{N}_d = \dot{N}_1 + \dot{N}_2 + \dot{N}_3 \tag{1.82}$$

1.4.4. Łączne funkcjonowanie stref

Natężenie przepływu tworzywa może być objętościowe $\dot{W}$ w m^3/s, jak również masowe $\dot{G}$ w kg/s; pierwsze z nich nazywa się również *strumieniem objętości* lub *wydajnością objętościową*, drugie zaś — *strumieniem masy* lub *wydajnością masową*, przy czym

$$\dot{G} = \dot{W} \rho (p, t) \tag{1.83}$$

lub

$$\dot{G} = \dot{W} \frac{1}{v(p, t)} \tag{1.84}$$

gdzie ρ jest gęstością tworzywa pod ciśnieniem p i w temperaturze t, natomiast v — objętością właściwą w tych samych warunkach.

Przedstawione w p. 1.4.1, 1.4.2 i 1.4.3 natężenia przepływu: objętościowe $\dot{W}$ lub masowe $\dot{G}$, nazywa się *nominalnymi*. Różnią się one od rzeczywistych nie tylko wskutek niespełniania przyjętych założeń upraszczających, ale również dlatego, że w warunkach produkcyjnych procesy przetwórstwa często nie są prowadzone przy parametrach przyjętych do obliczeń, lecz nieco odbiegających od nich, zatem

$$\dot{W}_{rz} = \dot{W} \mu_1 \tag{1.85}$$

lub

$$\dot{G}_{rz} = \dot{G} \mu_2 \tag{1.86}$$

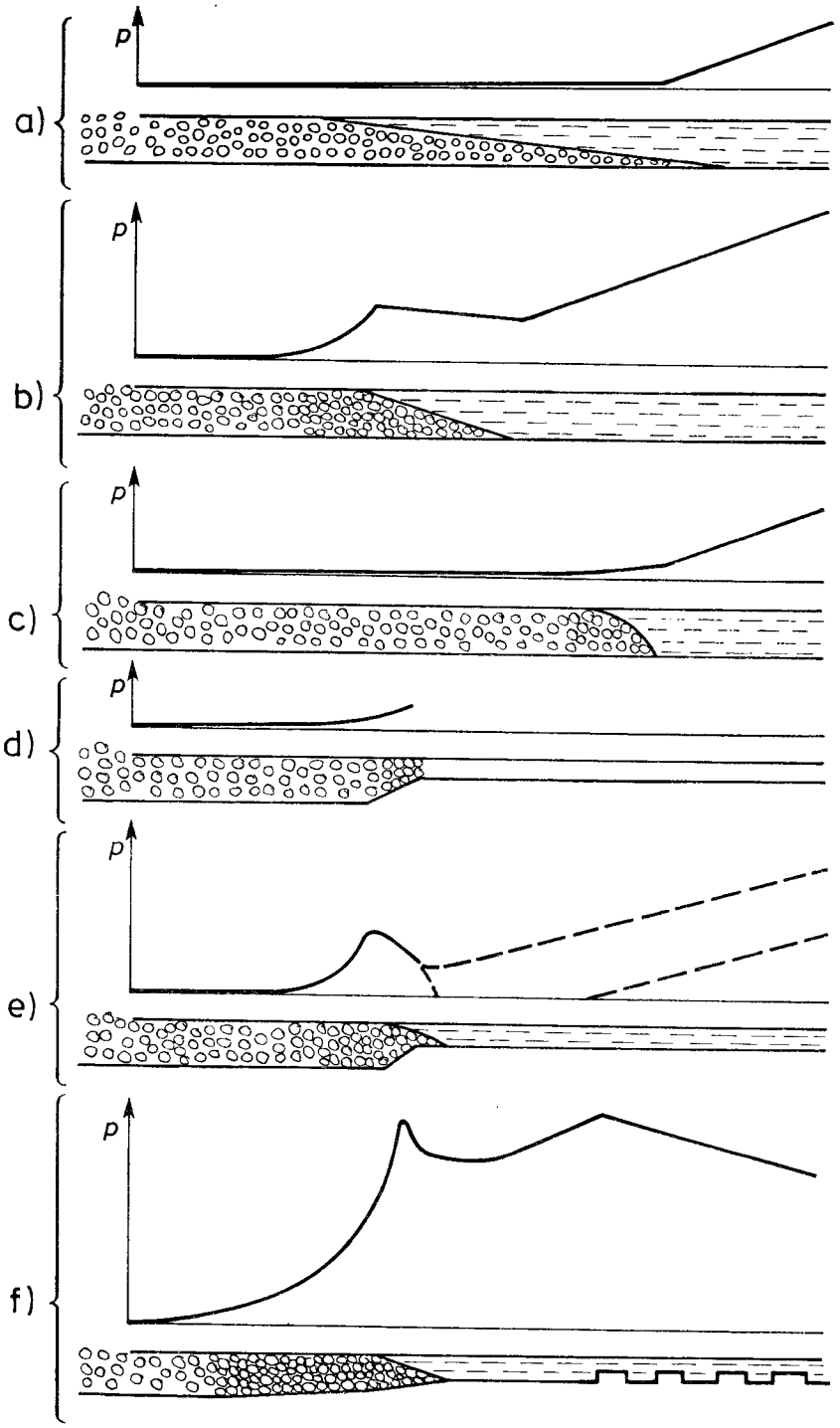
Współczynniki μ_1 oraz μ_2 są na ogół mniejsze od jedności. Poza tym w procesie wtryskiwania rzeczywiste natężenia przepływu są zawsze mniejsze od nominalnych, co wynika z istoty procesu wtryskiwania. W cyklu tego procesu są bowiem fazy, w których zachodzi tylko sprężanie oraz transportowanie i to w innych warunkach kinematycznych i dynamicznych niż opisane dotąd.

W punkcie 1.4.3 wykazano, że zmniejszanie głębokości kanału w strefie zasilania wynika z konieczności kompensowania ściśliwości tworzywa, które przemieszczając się jest poddawane działaniu coraz wyższego ciśnienia. Dlatego też, aby można było

wytworzyć odpowiednie ciśnienie, konieczne jest zmniejszanie głębokości kanału już w tej strefie. Dalsze zmniejszanie głębokości kanału powinno występować w strefie przemiany, tak aby skompensować zmniejszanie objętości tworzywa wynikające z likwidacji porów gazowych podczas przechodzenia w stan plastyczny i ciekły oraz skompensować zmniejszanie objętości wskutek ściśliwości. Zarówno zbyt powolne zmniejszanie głębokości kanału lub — w przypadku skrajnym — stosowanie ślimaka o stałej głębokości kanału, jak i zbyt gwałtowne zmniejszanie głębokości stanowią przyczyny nieustaloności przepływu. Zjawisko to wyjaśniono modelowo na rys. 1.47.

Jeżeli kanał ślimaka ma stałą głębokość, to rozluźnione tworzywo podawane przez otwór wysypowy jest w pierwszej fazie procesu uplastyczniania transportowane również w stanie rozluźnionym. Z tego powodu nie można w strefie zasilania wytworzyć ciśnienia i strefa ta pełni wówczas funkcję głównie transportową. Rozluźnione tworzywo gorzej przewodzi ciepło i dlatego nagrzewanie, a następnie przechodzenie w stan plastyczny i ciekły jest w tych warunkach mało intensywne i odbywa się na znacznej długości kanału. Strefa dozowania skraca się i wytwarza zbyt niskie ciśnienie, wymuszające za mały wypływ tworzywa z układu (rys. 1.47a). Sukcesywne podawanie tworzywa powoduje stopniowe jego zagęszczanie. To z kolei umożliwia wytworzenie ciśnienia już w strefie zasilania oraz intensywniejsze przemiany stanów fizycznych, wydłuża strefę dozowania i w sumie zwiększa ciśnienie, co wymusza szybszy wypływ tworzywa z układu (rys. 1.47b). W efekcie występuje obserwowane doświadczalnie oddzielanie (szybsze transportowanie) plastycznego lub stopionego tworzywa od tworzywa w stanie stałym. Wywołuje to ponowne skracanie strefy dozowania oraz rozluźnienie tworzywa w stanie stałym, jak na rys. 1.47c, co doprowadza znowu do stanu jak na rys. 1.47a. Konsekwencją takiego przebiegu procesu są nadmierne pulsacje ciśnienia oraz związane z nimi pulsacje natężenia przepływu i fluktuacje temperatury. Zbyt gwałtowne zmniejszanie głębokości kanału powoduje w pierwszym etapie charakterystyczne dla tworzywa w stanie stałym korkowanie przepływu (rys. 1.47d). Odblokowanie przepływu następuje pod wpływem ciśnienia wytworzonego w strefie zasilania w wyniku zagęszczania tworzywa. W odkorkowaniu przepływu jest też pomocne przechodzenie tworzywa w stan plastyczny i ciekły. Ponieważ strefa uskoku głębokości kanału ogranicza przepływ, występuje oddzielanie się plastycznego lub stopionego tworzywa, jak to już przedstawiono na rys. 1.47b, z konsekwencjami w postaci pulsacji ciśnienia i natężenia przepływu oraz fluktuacji temperatury (rys. 1.47e).

Właściwie zaprojektowany kanał ślimaka (rys. 1.47f) powinien już w strefie zasilania mieć zmniejszającą się głębokość, stosownie do generowanego w tej strefie ciśnienia. Narastające ciśnienie umożliwia wytworzenie dużej jego wartości. Ściśnięte tworzywo ulega szybszym przemianom fazowym, a w następnych strefach może być poddawane dalszemu narastającemu ciśnieniu. Jeżeli w strefie dozowania znajdują się elementy intensywnego ścinania i mieszania, to w ich obszarze następuje spadek ciśnienia oraz wzrost temperatury tworzywa przy ograniczeniu pulsacji i fluktuacji. Ciśnienie tworzywa opuszczającego układ jest jednak na tyle wysokie, że wystarcza na pokonanie oporów przepływu przez narzędzie przetwórcze (wytłaczanie i wtryskiwanie) i na całkowite wypełnienie jego gniazda formującego (wytryskiwanie).



Rys. 1.47. Modelowe przedstawienie funkcjonowania uplastyczniającego układu jednoślimakowego: a), b), c) fazy działania w przypadku kanału o stałej głębokości, d) oraz e) fazy działania w przypadku występowania gwałtownego zmniejszenia głębokości kanału, f) przypadek ślimaka o dobrze zaprojektowanym kanale z elementami intensywnego ścinania i mieszania

Strefy zasilania, przemiany i dozowania są ściśle współzależne, tworząc podstawową część układu uplastyczniającego jednoślimakowego. Z zachowania warunku ciągłości strumienia objętości lub masy wynika, że strumień objętości lub masy tworzywa jest nie tylko taki sam w poszczególnych miejscach stref, ale również w odniesieniu do całych stref, zatem

$$\dot{W}_u = \dot{W}_z + \dot{W}_p + \dot{W}_d \tag{1.87}$$

bądź

$$\dot{G}_u = \dot{G}_z + \dot{G}_p + \dot{G}_d \tag{1.88}$$

gdzie indeksy u, z, p oraz d oznaczają: u — uplastyczniający układ jednoślimakowy, z — strefę zasilania, p — strefę przemiany, d — strefę dozowania.

Podobnie jak w przypadku innych wielkości charakteryzujących układ, np. moc napędu ślimaka jest sumą mocy napędu w poszczególnych strefach, przeto

$$\dot{N}_u = \dot{N}_z + \dot{N}_p + \dot{N}_d \tag{1.89}$$

Moc silnika napędowego ruchu obrotowego ślimaka jest większa od mocy tak wyznaczonej ze względu na sprawność układu napędowego, a więc

$$\dot{N}_s = \frac{\dot{N}_u}{\mu_3} \tag{1.90}$$

gdzie μ_3 oznacza współczynnik uwzględniający sprawność układu napędowego (przeciętnie $\mu_3 = 0{,}8 \div 0{,}9$).

Do zagadnienia mocy napędu ruchu obrotowego ślimaka i mocy silnika napędowego można podejść inaczej. Moc napędu ślimaka składa się z sumy mocy procesów składowych, tj. mocy nagrzewania, sprężania, mieszania i transportowania. Zdecydowanie dominującą wartość ma moc nagrzewania. Okazuje się, że można ją określić, z na ogół wystarczającą dokładnością, ze wzoru

$$\dot{Q} = \dot{G}\ \Delta H \tag{1.91}$$

gdzie ΔH oznacza przyrost entalpii właściwej tworzywa podczas wzrostu jego temperatury od wartości w strefie zasypu do wartości w momencie opuszczania układu jednoślimakowego. Moc napędu ruchu obrotowego ślimaka przemienia się w jedną ze składowych mocy $\dot{Q}$ — druga składowa pochodzi z mocy grzejników, zatem

$$\dot{N}_u = \dot{Q}\,\mu_4 \tag{1.92}$$

Wielkość μ_4 stanowi stosunek mocy napędu do mocy $\dot{Q}$, jej wartość szacuje się przeciętnie od 0,5 wzwyż w procesie politropowym do 1 w procesie autotermicznym. Wzór na moc silnika napędowego ma więc postać

$$\dot{N}_s = \frac{\dot{Q}\mu_4}{\mu_3 \mu_5} \tag{1.93}$$

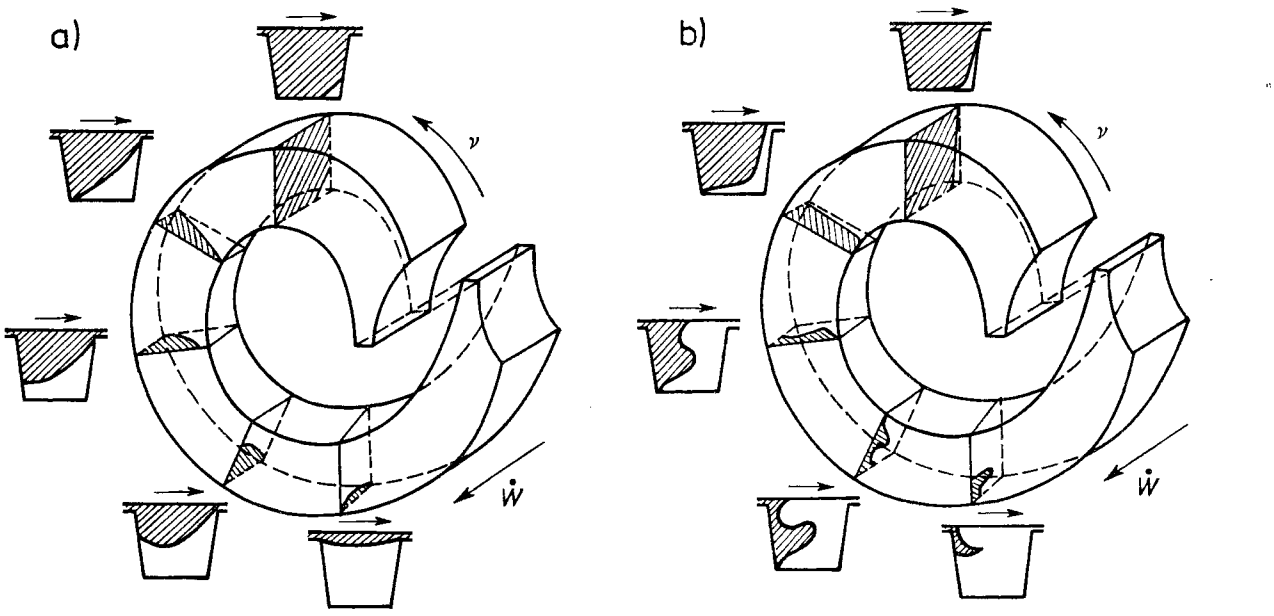
gdzie μ_5 oznacza współczynnik uwzględniający straty składowej mocy $\dot{Q}$ (szacuje się go przeciętnie na 0,9).

1.5. Zarys teorii układu dwuślimakowego

Teoria układu uplastyczniającego dwuślimakowego jest złożona i ciągle jeszcze mało poznana. Jej elementy zostaną podane w odniesieniu do strefy dozowania ślimaków walcowych (p. 1.2.2), gdzie tworzywo znajduje się w stanie plastycznym, z podziałem na dwie części: charakterystykę fizyczną i natężenie przepływu.

1.5.1. Charakterystyka fizyczna

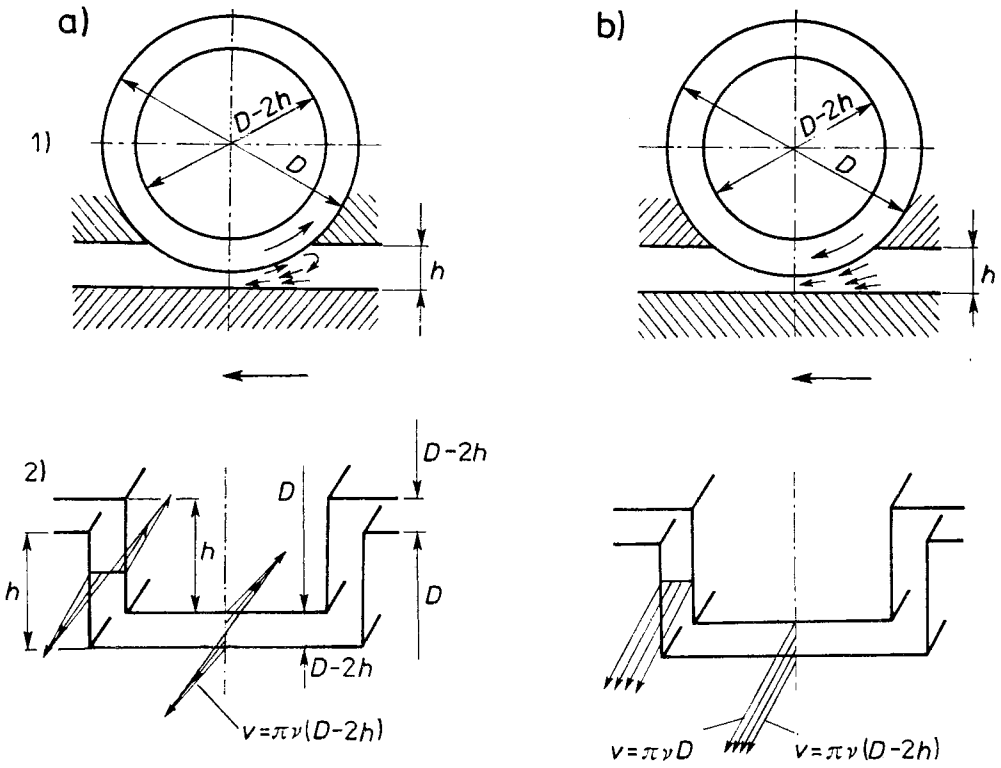
W przypadku uplastyczniającego układu dwuślimakowego współbieżnego o ślimakach zazębiających się nieszczelnie, według L. Janssena [1.27, 1.28] przejście tworzywa ze stanu stałego w stan plastyczny i następnie — jeżeli zachodzi taka potrzeba — w stan ciekły, rozpatrywane modelowo w przekroju poprzecznym bruzdy w kształcie zwichrowanej litery C, odbywa się nieco inaczej, gdy tworzywo znajduje się pod niskim lub pod wysokim ciśnieniem (rys. 1.48). Jeżeli temperatura ścianki cylindra staje się wyższa niż temperatura mięknienia tworzywa, to tworzywo znajdujące się pod niskim



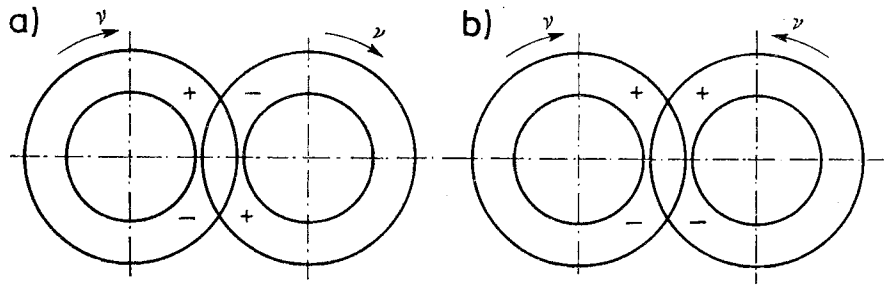
Rys. 1.48. Zachowanie się tworzywa w przekroju poprzecznym bruzdy podczas przechodzenia ze stanu stałego w stan plastyczny: a) tworzywo znajduje się pod niskim ciśnieniem, b) tworzywo znajduje się pod wysokim ciśnieniem

ciśnieniem zaczyna przechodzić w stan plastyczny w warstwie bezpośrednio stykającej się ze ścianką, natomiast tworzywo znajdujące się pod wysokim ciśnieniem zaczyna przechodzić w stan plastyczny w części warstwy przylegającej do aktywnej powierzchni zwoju, bliżej ścianki cylindra. Dalsze etapy procesu są przedstawione na rys. 1.48.

W szczelinach walcowych i bocznych układu współbieżnego, wskutek przeciwnych kierunków ruchu powierzchni ślimaków, zachodzi intensywne ścinanie prowadzące do rozdrabniania cząstek tworzywa, przy występowaniu naprężeń stycznych o przeciwnych sobie zwrotach, co powoduje wydłużenie czasu przebywania i zmniejszenie przepływu tworzywa w układzie, ale zwiększa intensywność jego mieszania (rys. 1.49a). Natomiast w przypadku układu przeciwbieżnego występuje walcowanie tworzywa w szczelinach czołowych i ugniatanie w szczelinach bocznych (rys. 1.49b), a ponieważ powierzchnie wykonują ruch zgodny, skraca się czas przebywania i zwiększa natężenie przepływu tworzywa w układzie, lecz zmniejsza intensywność mieszania (naprężenia styczne są w tych samych warunkach uplastyczniania około czterokrotnie mniejsze i skierowane tylko w jednym kierunku). W przedstawionym modelu pominięto — dla lepszej komunikatywności — ruch tworzywa odbywający się pomiędzy bruzdami, z jednego ślimaka na drugi. Można więc wskazać główne kierunki zastosowań układów dwuślimakowych: układy



Rys. 1.49. Ruch tworzywa w wyizolowanej szczelinie międzyzwojowej układu uplastyczniającego dwuślimakowego: a) układ współbieżny, b) układ przeciwbieżny, 1) przekrój poprzeczny w stosunku do osi ślimaków z uproszczeniem polegającym na rozwinięciu jednego ze ślimaków, 2) przekrój wzdłużny przez jeden zazębiający się nieszczelnie zwój

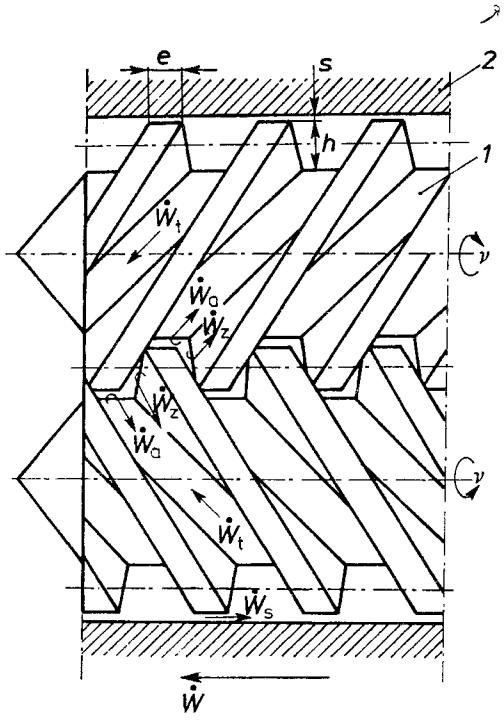


Rys. 1.50. Rozkład obszarów największego (+) i najmniejszego (−) ciśnienia tworzywa wzdłuż bruzd ślimaków w układzie współbieżnym (a) oraz przeciwbieżnym (b)

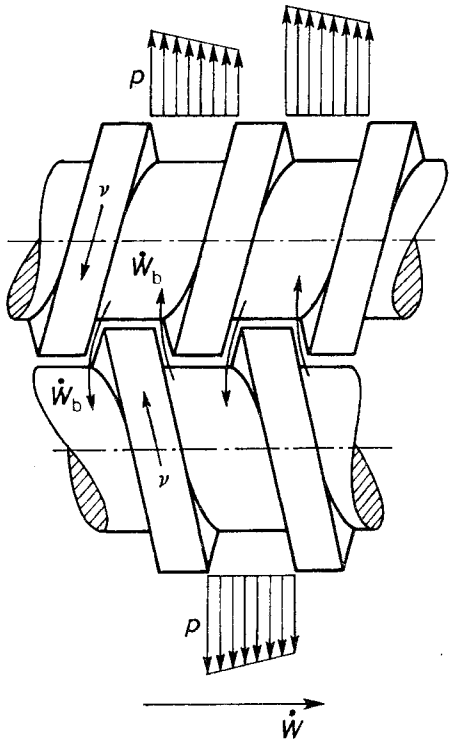
współbieżne stosuje się przede wszystkim do mieszania traktowanego jako cel przetwórstwa, a układy przeciwbieżne — do wytłaczania i wtryskiwania.

Ciśnienie tworzywa wzdłuż bruzd ślimaków ulega zmianie: największe występuje w obszarach nacierania tworzywa przy zbliżaniu się bruzdy do zwoju, a najmniejsze w obszarach odpływu tworzywa przy rozchodzeniu się bruzdy i zwoju. Zatem inny jest rozkład tych obszarów w układzie współbieżnym i inny w układzie przeciwbieżnym (rys. 1.50).

Do dalszych rozważań bierze się pod uwagę układ o większym znaczeniu, czyli układ przeciwbieżny. Na rysunku 1.51 przedstawiono fragment takiego układu z zaznaczeniem większości występujących rodzajów przepływu tworzywa w stanie plastycznym lub ciekłym. Są to:



Rys. 1.51. Fragment uplastyczniającego układu dwuślimakowego przeciwbieżnego z zaznaczeniem ważniejszych rodzajów przepływu w widoku na stronę ślimaków, gdzie znajdują się obszary o najmniejszym ciśnieniu: *1* — ślimaki, *2* — cylinder, $\dot{W}$ — objętościowe natężenie przepływu tworzywa w układzie; pozostałe oznaczenia w tekście (przepływ międzyślimakowy $\dot{W}_b$ jest niewidoczny)



Rys. 1.52. Układ przeciwbieżny w widoku od strony ślimaków, gdzie znajdują się obszary o największym ciśnieniu tworzywa z zaznaczeniem przepływu międzyślimakowego $\dot{W}_b$

1) *przepływ międzyślimakowy (też międzybruzdowy)* $\dot{W}_b$; występuje on w szczelinie pomiędzy powierzchniami bocznymi zwojów ślimaków — tworzywo przepływa z bruzdy poprzedzającej jednego ślimaka do sąsiedniej bruzdy drugiego ślimaka tylko po jednej stronie ślimaków, a mianowicie po stronie, gdzie znajdują się obszary o największym ciśnieniu (rys. 1.52),

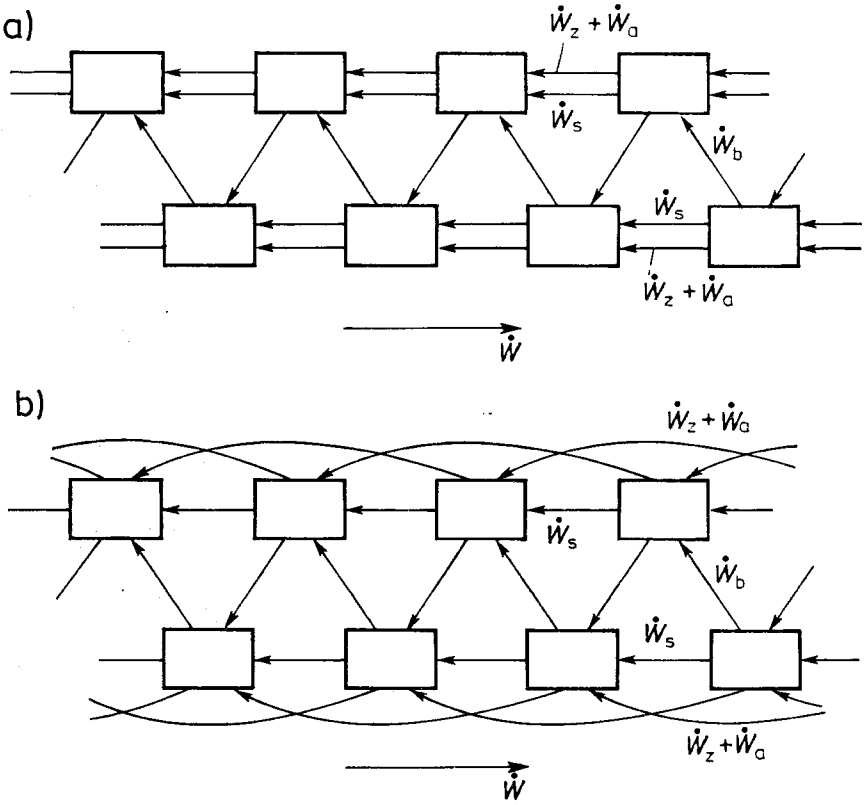
2) *przepływ międzyzwojowy* odbywający się w szczelinach międzyzwojowych, dzielony na:

— *przepływ międzyboczny* $\dot{W}_z$; odbywa się on w szczelinie pomiędzy powierzchniami bocznymi zwojów ślimaków w płaszczyźnie w przybliżeniu prostopadłej do przepływu $\dot{W}_b$; jest on pokazany również na rys. 1.49b; składa się z dwu przepływów składowych, tj. przepływu międzybocznego ciągnionego $\dot{W}_{z1}$ i przepływu międzybocznego ciśnieniowego $\dot{W}_{z2}$, przy czym $\dot{W}_z = \dot{W}_{z1} + \dot{W}_{z2}$,

— *przepływ międzywalcowy* $\dot{W}_a$; zachodzi on w szczelinie pomiędzy walcami — dnem wrębu jednego ślimaka a grzbietem zwoju drugiego ślimaka; jest on także przedstawiony na rys. 1.49b,

3) *przepływ przeciekowy* $\dot{W}_s$; występuje on w szczelinie pomiędzy grzbietem zwojów ślimaków a powierzchnią wewnętrzną cylindra.

Jeżeli poszczególne wydzielone bruzdy przedstawi się umownie jako prostokąty usytuowane jeden za drugim, to omówione przepływy tworzywa można zobrazować liniami rysunkowymi zakończonymi strzałkami, tak jak to uczyniono na rys. 1.53.

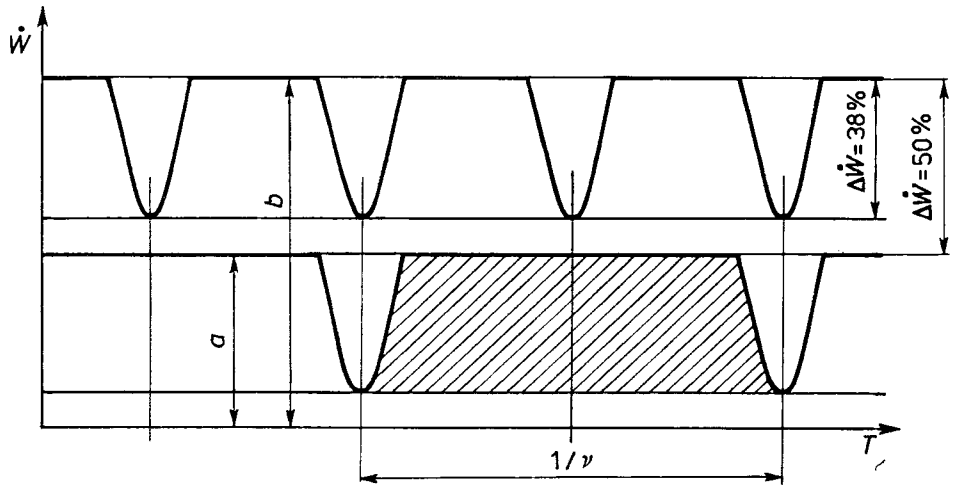


Rys. 1.53. Schematyczne przedstawienie większości rodzajów przepływu tworzywa w układzie dwuślimakowym przeciwbieżnym: a) ślimaki jednozwojowe, b) ślimaki dwuzwojowe; prostokąty oznaczają poszczególne wydzielone bruzdy; oznaczenia przepływów w tekście [1.28]

Z powiększaniem się krotności zwojów ślimaków wzrasta pole ich powierzchni, np. ślimaki dwuzwojowe (jak na rys. 1.51) mają około 1,8 razy, natomiast ślimaki czterozwojowe około 2,6 razy większe pole powierzchni niż pole powierzchni wewnętrznej cylindra [1.10]. Pole powierzchni ślimaków ma znaczny wpływ na ilość ciepła generowanego wskutek tarcia tworzywa, stanowiącego część energii napędu ruchu ślimaków; zatem z powiększaniem się krotności zwojów ślimaków zwiększa się stosunek ilości ciepła generowanego wskutek tarcia do ilości ciepła przenoszonego z grzejników mocowanych na cylindrze. Generowanie ciepła wskutek tarcia bywa tak

intensywne, że dla zapobieżenia miejscowym rozkładom cieplnym tworzywa konieczne staje się chłodzenie ślimaków, zwłaszcza ich końcówek.

Bruzdy wypełnione tworzywem są przy końcu strefy dozowania kolejno opróżniane, co powoduje pulsację natężenia przepływu tworzywa w tym miejscu (p. 1.8). Pulsacja ta zależy głównie od luzów międzyzwojowych i krotności zwojów ślimaków (rys. 1.54). W przypadku ślimaków jednozwojowych, zazębiających się nieszczelnie, występują dwie pulsacje na jeden obrót ślimaków o amplitudzie 38% natężenia przepływu, a w przypadku ślimaków zazębiających się szczelnie częstotliwość pulsacji



Rys. 1.54. Przebieg pulsacji natężenia przepływu tworzywa przy końcu strefy dozowania w układach ze ślimakami jednozwojowymi: *a* — natężenie odniesione do jednego ze ślimaków, *b* — natężenie odniesione do obu ślimaków (pole zakreskowane odpowiada objętości jednej bruzdy) [1.10]

Tablica 1.4

Zależność pulsacji natężenia przepływu tworzywa od krotności zwojów ślimaków w układzie dwuślimakowym [1.10]

Krotność zwojów ślimaków	Częstotliwość pulsacji	Amplituda pulsacji, %
1	2	38
2	5	19
3	7	5
4	9	2

jest taka sama, ale jej amplituda wzrasta do 50%. Z powiększaniem się krotności zwojów ślimaków rośnie liczba pulsacji na jeden obrót ślimaków i zmniejsza się amplituda (tabl. 1.4). Pulsacja w kanale dyszy podczas opuszczania układu jest mniejsza, gdyż przy wejściu do kanału oraz w nim zachodzi tłumienie pulsacji.

1.5.2. Natężenie przepływu

Oprócz scharakteryzowanych w poprzednim punkcie przepływów tworzywa, w uplastyczniającym układzie dwuślimakowym przeciwbieżnym wyróżnić można jeszcze *przepływ teoretyczny* $\dot{W}_t$. Przepływ ten tworzą przesuwające się bruzdy

w kształcie zwichrowanej litery C (rys. 1.13 i rys. 1.48). **Zatem objętościowe natężenie** przepływu tworzywa w układzie uplastyczniającym dwuślimakowym, mającym ślimaki o krotności i zwojów, zwane również wydajnością objętościową układu, może być wyrażone wzorem ogólnym

$$\dot{W} = \dot{W}_t - \dot{W}_b - 2\dot{W}_s - 2i(\dot{W}_z + \dot{W}_a) \tag{1.94}$$

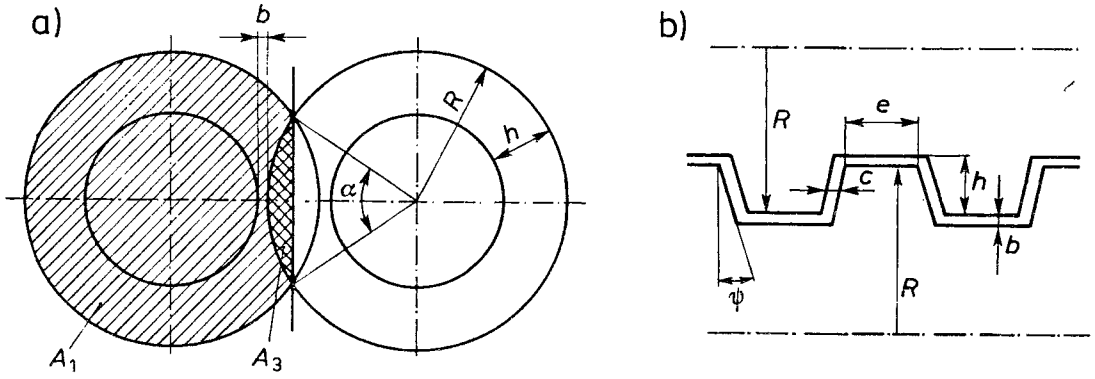
Przepływ teoretyczny jest wprost proporcjonalny do prędkości obrotowej v ślimaków, krotności i zwojów oraz do objętości V pojedynczej bruzdy

$$\dot{W}_t = 2iVv \tag{1.95}$$

przy czym

$$V = \frac{V_1 - V_2 - iV_3}{i} \tag{1.96}$$

gdzie V_1 oznacza objętość odpowiadającą powierzchni A_1 zakreskowanej na rys. 1.55a, V_2 — objętość odpowiadającą średnicy rdzenia ślimaka, V_3 — objętość odpowiadającą powierzchni A_3 zakreskowanej na rys. 1.55a.



Rys. 1.55. Elementy geometryczne zazębienia ślimaków: a) w przekroju poprzecznym, b) w przekroju wzdłużnym; oznaczenia w tekście

Objętość V_1 wyznacza się z zależności geometrycznych na podstawie rys. 1.55a:

$$V_1 = \left[\left(\pi - \frac{\alpha}{2}\right) R^2 + \left(R - \frac{h}{2}\right)\sqrt{\left(Rh - \frac{h^2}{4}\right)}\right] t \tag{1.97}$$

We wzorze tym t oznacza skok linii śrubowej zwoju (p. 1.2.2), α zaś — kąt środkowy wyrażony w radianach, określony zależnością

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{Rh - \frac{h^2}{4}}}{R - \frac{h}{2}} \tag{1.98}$$

Objętość V_2, zgodnie z elementarną zależnością geometryczną (rys. 1.55a), wynosi

$$V_2 = \pi(R - h)^2 t \tag{1.99}$$

Objętość V_3 wyznacza się z zależności

$$V_3 = \int_{R-h}^{R} e(r)\, 2\pi r\, \mathrm{d}r \tag{1.100}$$

w której

$$e(r) = e + 2(R - r)\ \mathrm{tg}\ \psi \tag{1.101}$$

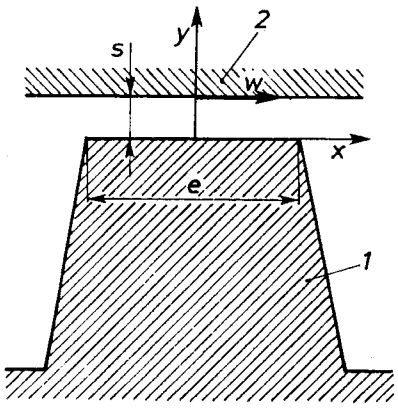
a po wykonaniu działań

$$V_3 = 2\pi\left[\left(Rh - \frac{h^2}{2}\right) b + \left(R\,h^2 - \frac{2}{3}h^3\right)\mathrm{tg}\ \psi\right] \tag{1.102}$$

Litera e oznacza szerokość grzbietu zwoju, ψ zaś — kąt pochylenia płaszczyzny bocznej zwoju w stosunku do płaszczyzny prostopadłej do wierzchołków zwojów (rys. 1.55b).

Można teraz przystąpić do wyprowadzania zależności określających przepływy przeciwdziałające przepływowi teoretycznemu. Ogólnie biorąc, wyprowadzenia te są dość skomplikowane. Stosunkowo prostsze jest wyprowadzenie wzoru na przepływ przeciekowy $\dot{W}_s$. Przepływ ten występuje w szczelinie, jak na rys. 1.56. Przyjmując założenie, że tworzywo jest płynem niutonowskim, a przepływ izotermiczny i laminarny oraz $s \ll e$, równanie różniczkowe przepływu Naviera–Stokesa można napisać w postaci

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} = \eta \frac{\mathrm{d}^2 v_x}{\mathrm{d}y^2} \tag{1.103}$$



Rys. 1.56. Fragment usytuowania wzajemnego zwoju (*1*) ślimaka oraz cylindra (*2*); pozostałe oznaczenia w tekście

Całkując dwukrotnie to równanie i przyjmując warunki brzegowe tak, jakby ślimak był nieruchomy, a przesuwał się cylinder, czyli dla $y = 0$; $v_x = 0$ oraz dla $y = s$; $v_x = w$, otrzymuje się wyrażenie

$$v_x = \frac{1}{2\eta}(y^2 - s\,y)\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} + \frac{w\,y}{s} \tag{1.104}$$

podobne do zależności (1.53). Całkowanie równania (1.104) w granicach od 0 do s oraz pomnożenie przez długość szczeliny (jednego zwoju) daje wzór na przepływ przeciekowy

$$\dot{W}_s = (2\pi - \alpha)\, R \left(\frac{w\, s}{2} + \frac{s^3}{12\eta} \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} \right) \tag{1.105}$$

Przyjmuje się, że

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} = \frac{\Delta p}{\Delta x}$$

oraz

$$\Delta x = e \tag{1.106}$$

Spadek ciśnienia na jednym zwoju może być wyznaczony z zależności

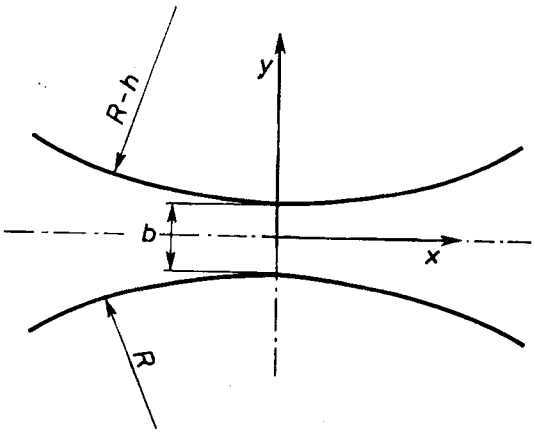
$$\Delta p = 6\,\eta \frac{w}{h^2} \left(\frac{t}{i} - e \right) + 2\,\Delta P \tag{1.107}$$

w której ΔP stanowi spadek ciśnienia między końcem i początkiem strefy dozowania. Podstawiając trzy ostatnio podane zależności do równania (1.105), otrzymuje się po przekształceniach postać tego równania dogodną do stosowania

$$\dot{W}_s = (2\pi - \alpha) R \left\{ \frac{w\, s}{2} + \frac{s^3}{6\eta e} \left[3\,\eta \frac{w}{h^2} \left(\frac{t}{i} - e \right) + \Delta P \right] \right\} \tag{1.108}$$

gdzie $R = D/2$, w zaś oznacza prędkość liniową (osiową) tworzywa przy powierzchni cylindra (rys. 1.56), wyznaczaną z zależności

$$w = v\, t \tag{1.109}$$



Rys. 1.57. Szczelina międzywalcowa; oznaczenia w tekście (por. też rys. 1.49)

Przepływ międzywalcowy $\dot{W}_a$ występuje w szczelinie, jak na rys. 1.57. Przyjmując takie same założenia jak poprzednio i całkując identyczną postać równania Naviera–Stokesa oraz następnie przyjmując warunki brzegowe: dla $y = b/2 = a$; $v_x = 2\,\pi\, v(R - h)$ oraz dla $y = b/2 = -a$; $v_x = 2\,\pi\, v\, R$ (por. rys. 1.49), po przekształceniach otrzymuje się

$$v_x = \frac{1}{2\eta} (y^2 - a^2) \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} - \frac{\pi\, v\, h}{a} + 2\,\pi\, v(D - h) \tag{1.110}$$

Całkując to wyrażenie w granicach od $-a$ do a i mnożąc przez długość szczeliny, uzyskuje się wzór na przepływ międzywalcowy

$$\dot{W}_a = \int_{-a}^{a} v_x \left(\frac{t}{i} - e \right) dy \tag{1.111}$$

Po wykonaniu działań i szeregu przekształceń wzór ten przybiera postać

$$\dot{W}_a = \frac{4(t - e\,i)}{3\,i} \left[\pi\, v (D - h)\, b - \frac{\Delta p\, b^3}{6\,\pi\,\eta \sqrt{(D-h)b/2}} \right] \tag{1.112}$$

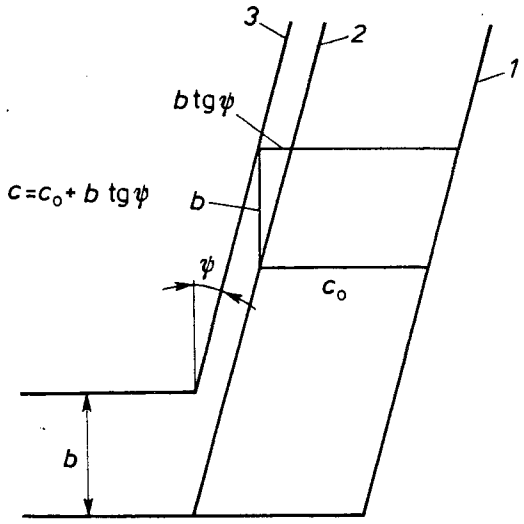
Przepływ międzyślimakowy (międzybruzdowy) $\dot{W}_b$ wyznacza się z zależności [1.28, 1.100]:

$$\dot{W}_b = 0{,}0054 \left(\frac{h}{R} \right)^{1{,}8} \left[\psi + 2 \left(\frac{c}{h} \right)^2 \right] \frac{\Delta p\, R^3}{\eta} \tag{1.113}$$

We wzorze tym c oznacza luz osiowy ślimaków, który wyznacza się z zależności (rys. 1.58)

$$c = c_0 + b \operatorname{tg} \psi \tag{1.114}$$

gdzie c_0 jest luzem osiowym podczas zazębiania się ślimaków bez luzu promieniowego, czyli gdy $b = 0$.



Rys. 1.58. Rysunek pomocniczy do wyznaczania zależności (1.114): *1* — powierzchnia zwoju ślimaka pierwszego, *2* — powierzchnia zwoju ślimaka drugiego podczas zazębiania się bez luzu promieniowego, ale z luzem osiowym c_0, *3* — powierzchnia zwoju ślimaka drugiego podczas zazębiania się z luzem promieniowym b i luzem osiowym c

Jak już podano w punkcie poprzednim, przepływ międzyboczny $\dot{W}_z$ jest sumą przepływu międzybocznego ciągnionego $\dot{W}_{z1}$ i przepływu międzybocznego ciśnieniowego $\dot{W}_{z2}$.

Rozpatrując przepływ międzyboczny ciągniony należy zauważyć, że prędkości liniowe na powierzchniach bocznych ślimaków zmieniają się od wartości $2\pi v(R - h)$ do wartości $2\pi v R$ (rys. 1.49), natomiast średnia prędkość wynosi

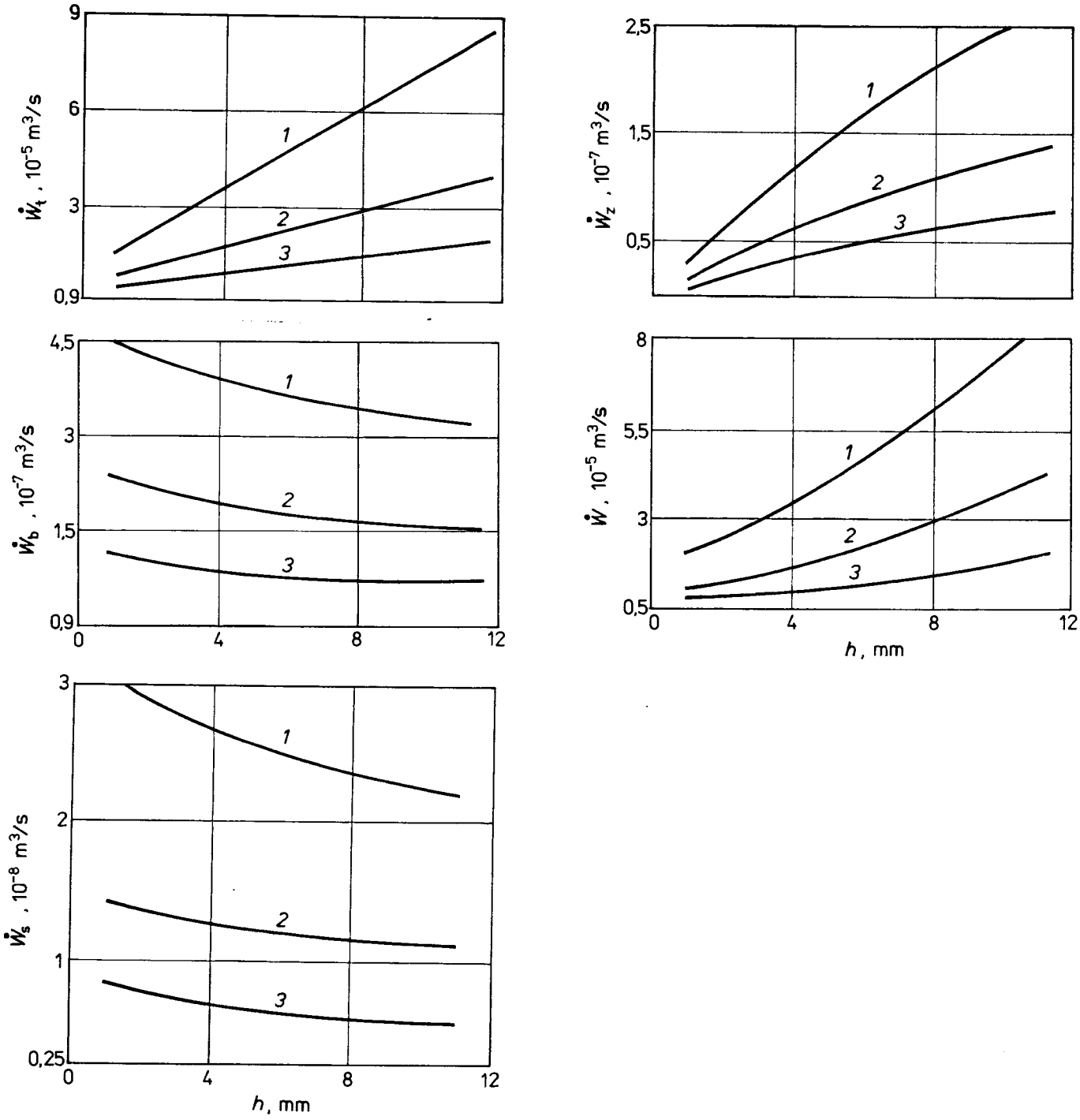
$$\bar{v} = \pi\, v\, (D - h) \tag{1.115}$$

Z rysunku 1.55b widać, że długość szczeliny międzybocznej wynosi

$$L = \frac{h - b}{\cos \psi} \tag{1.116}$$

szerokość zaś

$$f = c_0 \cos \psi + b \sin \psi \tag{1.117}$$



Rys. 1.59. Zależność objętościowego natężenia przepływu: teoretycznego $\dot{W}_t$, międzyślimakowego $\dot{W}_b$, przeciekowego $\dot{W}_s$, międzywalcowego $\dot{W}_a$ i międzybocznego $\dot{W}_z$ od głębokości h kanału oraz prędkości obrotowej ślimaków jednokrotnych w przypadku uplastyczniającego układu dwuślimakowego przeciwbieżnego z PE-LD: *1* — $v = 1$ s^{-1}, *2* — $v = 0{,}5$ s^{-1}, *3* — $v = 0{,}25$ s^{-1}

Zakładając, że tworzywo przywiera adsorpcyjnie do powierzchni bocznych ślimaków, a przepływ ciągniony stanowi iloczyn prędkości średniej $\bar{v}$, długości L oraz szerokości f szczeliny, zatem

$$\dot{W}_{zl} = \bar{v} L f \tag{1.118}$$

a po podstawieniu wzorów (1.115), (1.116) i (1.117) oraz po uwzględnieniu zależności (1.114)

$$\dot{W}_{z1} = \pi\, v\, (D - h)\, (h - b)\, c \tag{1.119}$$

Ujęcie matematyczne przepływu międzybocznego ciśnieniowego jest bardzo złożone. Zaleca się stosować aproksymację Webera [1.28]

$$\dot{W}_{z2} = \frac{\Delta p\, (h - b)\, c^3 \cos^2 \psi}{12\, \eta\, l} \left[1 - 0{,}63\, \frac{c \cos^2 \psi}{h - b} + 0{,}052 \left(\frac{c \cos^2 \psi}{h - b} \right)^5 \right] \tag{1.120}$$

gdzie l oznacza największą długość obszaru wzajemnego zachodzenia ślimaków na siebie.

We wzorach (1.112), (1.113) i (1.120) spadek ciśnienia Δp jest określany wzorem

$$\Delta p = 6\, \eta\, \frac{w}{h^2} \left(\frac{t}{i} - e \right) \tag{1.121}$$

Biorąc pod uwagę postacie matematyczne wyprowadzonych lub przytoczonych wzorów, można zauważyć za [1.35], że

$$\dot{W} = 2\, i\, v\, V - \Sigma\, \dot{W}_j(p) \tag{1.122}$$

gdzie j = b, s, z, a.

Analiza wpływu elementów geometrycznych ślimaków, ich prędkości obrotowej i lepkości tworzywa na wartości poszczególnych przepływów nastręcza pewne trudności. Na rysunku 1.59 przedstawiono niektóre wyniki w tym zakresie dla polietylenu o małej gęstości.

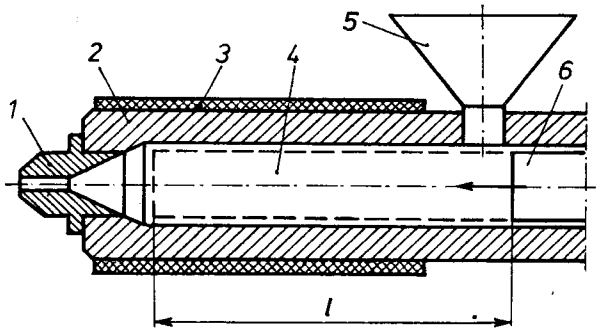
Analityczne ujęcie innych problemów, zwłaszcza reologicznych i termodynamicznych, jest bardzo mało rozpoznane; zarys niektórych z nich przedstawiono w literaturze [1.65, 1.104].

1.6. Uplastycznianie bezślimakowe

Jeżeli proces uplastyczniania zachodzi bez udziału ślimaka, to nazywa się on procesem bezślimakowym. Uplastycznianie bezślimakowe obejmuje uplastycznianie: tłokowe z jego licznymi odmianami, tarczowe, pierścieniowe, wirnikowe, liniowe, planetarne i kilka innych o bardzo małym znaczeniu.

1.6.1. Uplastycznianie tłokowe

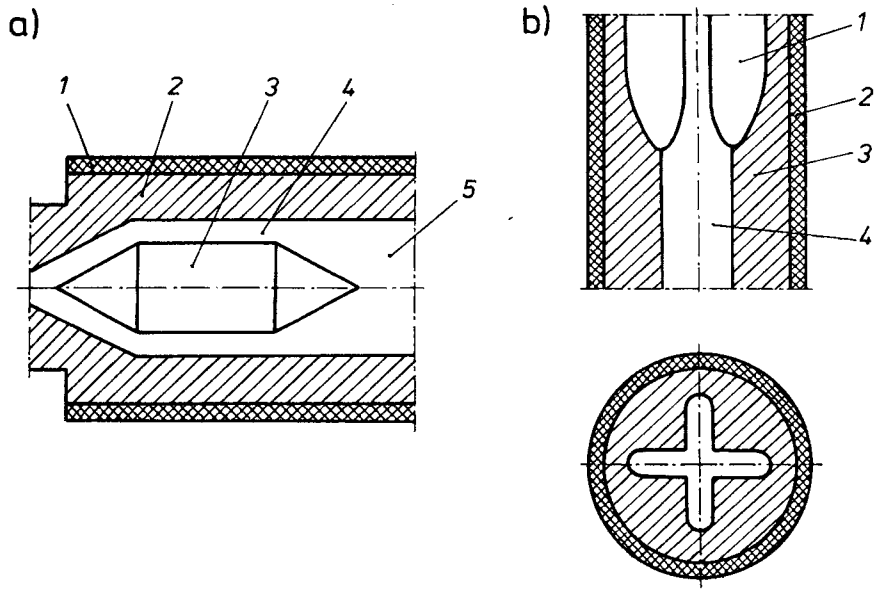
Najstarszym procesem uplastyczniania jest *uplastycznianie tłokowe klasyczne*. Odbywa się ono w uplastyczniającym układzie tłokowym klasycznym, który zalicza się do układów najprostszych. Układ tłokowy klasyczny składa się z zespołu mechanicznego, tworzonego przez cylinder z zakończeniem (np. dyszą) i tłok, z zespołu nagrzewająco-ochładzającego, tworzonego przez grzejniki lub nagrzewnice, urządzenia sterująco-regulujące i ewentualnie wentylatory, oraz z urządzeń pomocniczych. Na rysunku 1.60 przedstawiono podstawowe elementy składowe omawianego układu tłokowego. Tworzywo nagrzewa się na skutek przewodzenia ciepła od cylindra



Rys. 1.60. Klasyczny układ uplastyczniający tłokowy: *1* — dysza cylindra, *2* — cylinder, *3* — grzejniki elektryczne, *4* — tłok w przednim skrajnym położeniu, *5* — zasobnik, *6* — tłok w tylnym skrajnym położeniu, *l* — skok tłoka

i w stanie plastycznym lub ciekłym zostaje przemieszczone pod ciśnieniem za pomocą tłoka do narzędzia przetwórczego. Nagrzewanie tworzywa jest więc utrudnione, a homogenizacja bardzo mała.

Aby poprawić efektywnośc uplastyczniania, układy tłokowe mogą mieć wewnątrz cylindra element zwany rozdzielaczem, dawniej torpedą (rys. 1.61a). Istnieje wiele różnych rozwiązań konstrukcyjnych rozdzielacza. Ogólnie biorąc, rozdzielacze mogą być ogrzewane lub nieogrzewane. W rozdzielaczach nieogrzewanych ciepło powstaje dzięki tarciu podczas przepływu tworzywa pod działaniem tłoka, po powierzchni zewnętrznej oraz przez specjalnie skonstruowane w nich kanały. Innym rozwiązaniem poprawiającym efektywność uplastyczniania jest zwiększenie powierzchni wewnętrznej cylindra, poprzez odpowiednie jego ukształtowanie na określonym odcinku długości (rys. 1.61b). Układy te, zwane układami złożonymi, w konwencjonalnym znaczeniu zostały w dużym stopniu wyparte przede wszystkim przez układy ślimakowe.



Rys. 1.61. Konstrukcyjne sposoby zwiększania efektywności uplastyczniania układów tłokowych: a) zastosowanie rozdzielacza (torpedy); *1* — grzejniki elektryczne, *2* — cylinder, *3* — rozdzielacz bez kanałów nieogrzewany, *4* — kanał pomiędzy cylindrem i rozdzielaczem, *5* — odcinek cylindra, gdzie przesuwa się tłok, b) zwiększenie powierzchni wewnętrznej cylindra; *1* — odcinek cylindra o zwiększonej powierzchni wewnętrznej, *2* — grzejniki elektryczne, *3* — cylinder, *4* — odcinek cylindra, gdzie przesuwa się tłok

Układy tłokowe klasyczne stosuje się obecnie tylko raczej w specyficznych okolicznościach, głównie:

— ze względu na niskie koszty wykonania i łatwość obsługi, do wymiarowo małych układów, np. o objętości tworzywa uplastycznianego nie przekraczającej 10 cm^3 [1.78], w przypadku otrzymywania wytworów, którym nie stawia się dużych wymagań jakościowych,

— z uwagi na brak przepływów w układzie powodujących rozdrabnianie napełniacza w kształcie włókien krótkich, do uplastyczniania niektórych tworzyw z tymi napełniaczami, np. tworzyw poliestrowych [1.78],

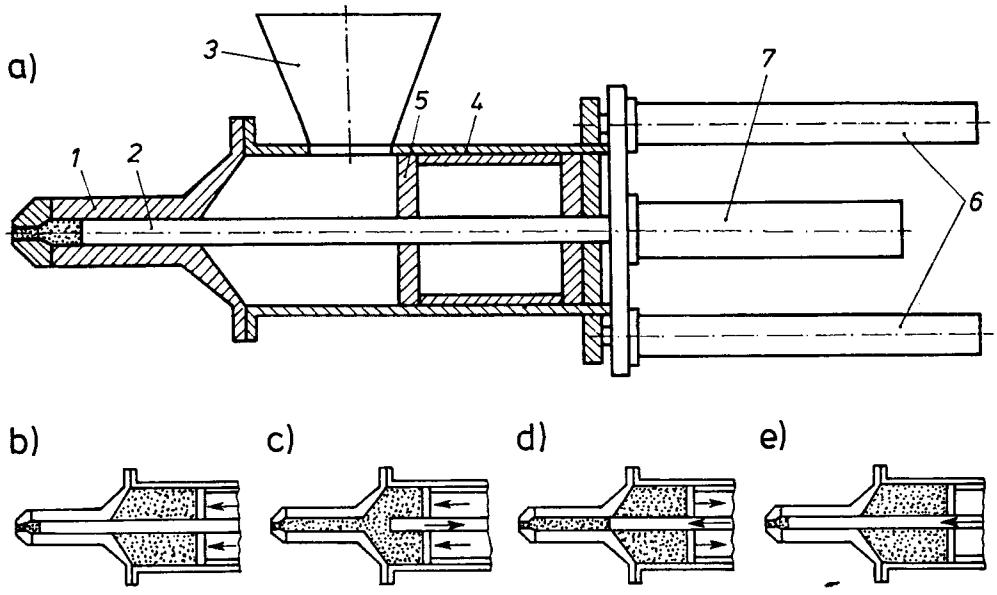
— ze względu na możliwość wytwarzania bardzo wysokiego ciśnienia tworzywa do 210 MPa, do uplastyczniania niektórych mieszanek elastomerowych [1.79],

— z uwagi na specyficzne właściwości cieplne i bardzo dużą wrażliwość PTFE na działanie naprężeń ścinających i ściskających oraz małą odporność na aglomerowanie podczas ruchu granulatu, do uplastyczniania tego tworzywa w procesie wytłaczania tłokowego [1.41].

Uplastycznianie tłokowe doczekało się również licznych, niekiedy daleko idących, modyfikacji.

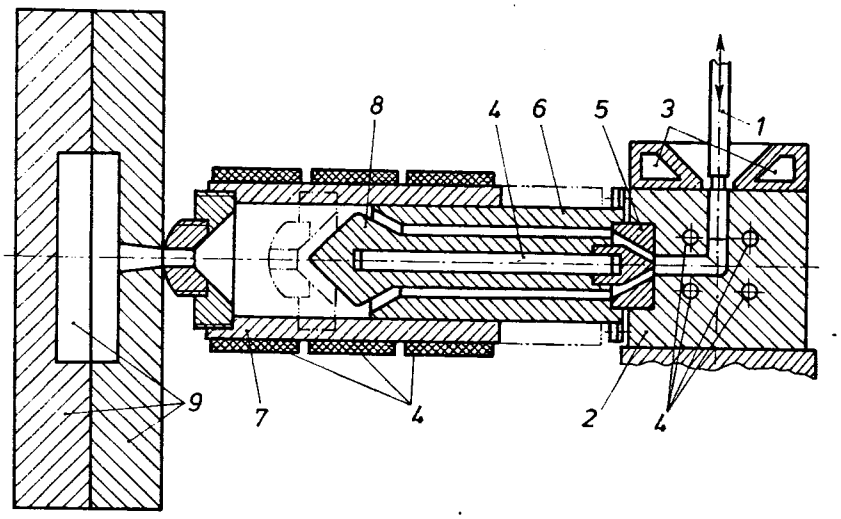
W 1962 r. w firmie Battenfeld (Niemcy) opracowano układ uplastyczniający wtryskarki, składający się z dwóch klasycznych układów tłokowych połączonych szeregowo; pierwszy — uplastyczniania wstępnego, drugi — uplastyczniania zasadniczego.

W firmie New Britain (Anglia) opracowano z kolei *układ uplastyczniający wtryskarki z dwoma współosiowymi tłokami* (rys. 1.62): pierścieniowym uplastyczniania wstępnego i kołowym wtryskowym, napędzanymi hydraulicznie. Główną zaletą układu jest możliwość kilkakrotnego wtryskiwania przy jednym skoku tłoka uplastyczniania wstępnego.



Rys. 1.62. Uplastyczniający układ tłokowy firmy New Britain: a) przekrój wzdłużny, b) rozpoczęcie cyklu — cylinder uplastyczniania wstępnego napełniony, c) napełnianie cylindra wtryskowego, d) zagęszczanie i wstępne ściskanie tworzywa w cylindrze wtryskowym, e) koniec cyklu wtryskiwania; *1* — cylinder wtryskowy, *2* — tłok wtryskowy, *3* — zasobnik, *4* — cylinder uplastyczniania wstępnego, *5* — tłok uplastyczniania wstępnego, *6* — siłowniki hydrauliczne tłoka uplastyczniania wstępnego, *7* — siłownik hydrauliczny tłoka wtryskowego

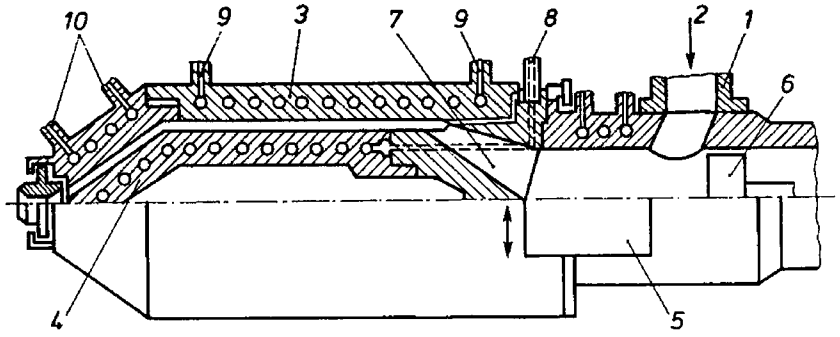
W 1971 r. firma Braas (Niemcy) przedstawiła na wystawie w Düsseldorfie wtryskarkę TA 1000/40 wyposażoną w układ uplastyczniający, zwany *teledynamicznym*. W układzie tym (rys. 1.63) tworzywo z zasobnika spada pod wpływem siły ciężkości do komory



Rys. 1.63. Uplastyczniający układ teledynamiczny firmy Braas; oznaczenia w tekście [1.13, 1.19]

sprężania (*2*), gdzie za pomocą drgającego z częstotliwością 4 Hz tłoka (*1*), chłodzonego (*3*) nad komorą (*2*), wywiera się na nie ciśnienie pulsujące o wartości nominalnej 30 MPa. Wstępnie uplastycznione tworzywo jest następnie przeciskane przez kanały płyty rozdzielczej (*5*); podczas przeciskania wydziela się duża ilość ciepła. Kanały zapobiegają również przepływowi wstecznemu tworzywa podczas wtrysku. Ponieważ energia drgań tłoka (*1*) pozwala na uplastycznienie tworzywa w 80%, konieczne jest ogrzewanie (*4*) komory sprężania (*2*), płyty rozdzielczej (*5*), teleskopowego cylindra zewnętrznego (*7*) i rozdzielacza (*8*). Uplastycznione tworzywo przedostaje się do kanału pierścieniowego utworzonego przez teleskopowy cylinder wewnętrzny (*6*) i rozdzielacz (*8*). Drgania powodują przemieszczanie się tworzywa do obszaru mieszczącego się w przedniej części teleskopowego cylindra zewnętrznego (*7*). Wtrysk odbywa się przez dosunięcie zamkniętej hydraulicznie formy wtryskowej (*9*) do teleskopowego cylindra zewnętrznego (*7*) tak daleko, jak wymaga tego nastawiona objętość wtrysku. Pulsacja ciśnienia powoduje obniżenie jego wartości koniecznej do wypełnienia gniazda formy, co tłumaczy się mniejszym przyleganiem tworzywa do ścianek cylindra. W związku z tym siła zamknięcia formy jest również mniejsza; pozwala to na stosowanie form aluminiowych lub ze stopów ZnAl znacznie tańszych od stalowych, co ma duże znaczenie przy krótkich seriach produkcyjnych. Istnieje również możliwość przetwarzania tworzywa w temperaturze o 10÷20°C niższej niż w układach ślimakowych, co pozwala skrócić czas ochładzania wypraski, a przez to także cały cykl wtryskiwania. Głównymi wadami układu teledynamicznego są: dość złożona budowa oraz konieczność sterowania i regulacji automatycznej wieku czynników, np. czterech odrębnych zespołów nagrzewających.

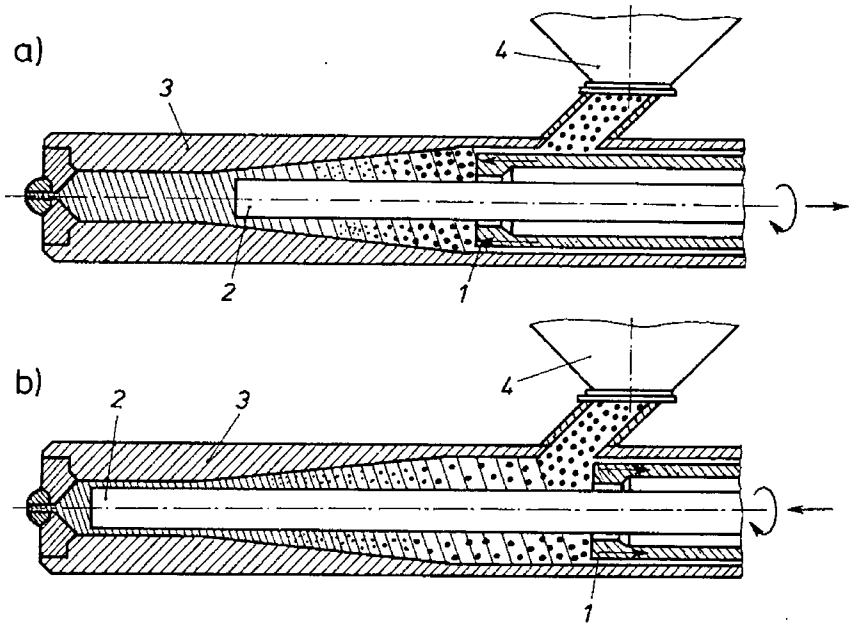
W 1975 r. w Instytucie Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Wyższej Szkoły Technicznej w Akwizgranie opracowano kolejną konstrukcję układu uplastyczniającego — *układu drganiowego* (rys. 1.64). Tworzywo, po wprowadzeniu do cylindra dozującego (*1*), jest przemieszczane pod ciśnieniem wywieranym przez tłok dozujący (*2*) do kanału pierścieniowego utworzonego przez cylinder układu (*3*) i rozdzielacz (*4*). W kanale tym



Rys. 1.64. Uplastyczniający układ drganiowy: *1* — cylinder dozujący, *2* — tłok dozujący, *3* — cylinder układu, *4* — rozdzielacz, *5* — źródło drgań, *6* — tłok wtryskowy, *7* — jarzma rozdzielacza, *8* — ogrzewanie rozdzielacza, *9* — ogrzewanie cylindra układu, *10* — ogrzewanie dyszy [1.13, 1.50]

tworzywo pozostaje tak długo pod działaniem drgań, aż osiągnie lepkość niezbędną do wtrysku. Drgania, o częstotliwości do 25 Hz i amplitudzie około 1 mm, może wykonywać zarówno rozdzielacz (*4*), jak i cylinder układu (*3*) — zasilane ze źródła drgań (*5*). Uplastycznione tworzywo jest wtryskiwane za pomocą tłoka wtryskowego (*6*). Okazało się, że wtryskiwanie w tych warunkach powoduje mniejsze rozdrabnianie włókien krótkich będących napełniaczem, poza tym wzrost częstotliwości drgań prowadzi do lepszej homogenizacji tworzywa, a w rezultacie słabszej orientacji włókien zmniejsza się również anizotropia właściwości wyprasek. Układ ten jest szczególnie zalecany do tworzyw poliestrowych wzmacnianych włóknami krótkimi.

Firma Aviaplastique (Francja) opracowała w 1976 r. *układ uplastyczniający Rheoplast wtryskarki, z dwoma współosiowymi tłokami* (rys. 1.65): pierścieniowym uplastyczniania wstępnego, wykonującym tylko ruch postępowo-zwrotny i kołowym wtryskowym, wykonującym ruch postępowo-zwrotny oraz ruch obrotowy. Układ wzbudził duże



Rys. 1.65. Uplastyczniający układ tłokowy Rheoplast firmy Aviaplastique: a) po pobraniu tworzywa z zasobnika, przed wtryskiem, b) po wtrysku, przed pobraniem tworzywa z zasobnika; *1* — tłok uplastyczniania wstępnego, *2* — tłok wtryskowy, *3* — cylinder, *4* — zasobnik; na rysunku nie pokazano grzejników [1.1]

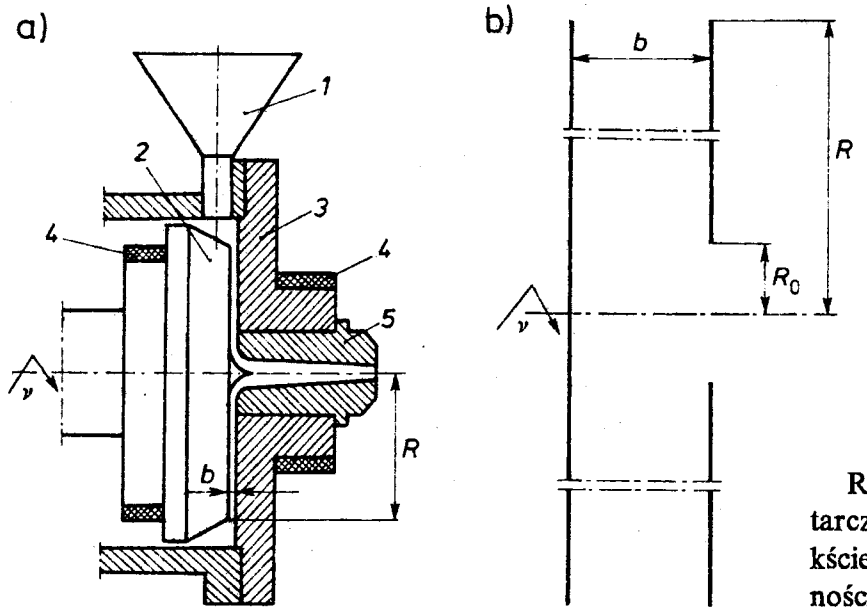
zainteresowanie i został wykorzystany praktycznie we wtryskarce **Rheomatic 40/32**, przeznaczonej do PVC twardego, elastomerów i tworzyw utwardzalnych.

1.6.2. Uplastycznianie tarczowe, pierścieniowe i wirnikowe

Wspólną cechą charakterystyczną uplastyczniania tarczowego, pierścieniowego i wirnikowego jest to, że odbywa się ono w zasadniczym stopniu wskutek ruchu obrotowego elementów kołowych o stosunku długości L do średnicy zewnętrznej D kilka, kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt razy mniejszym niż stosunek L/D w przypadku uplastyczniania ślimakowego.

Uplastycznianie tarczowe

W uplastycznianiu tarczowym wykorzystuje się efekt Weissenberga (1947 r.). Układ uplastyczniający tarczowy pokazano przykładowo na rys. 1.66a. Składa się on z zespołu mechanicznego, który tworzą obracająca się tarcza i przeciwtarcza z dyszą, zespołu nagrzewającego, który tworzą grzejniki lub nagrzewnice i urządzenia sterująco-regulujące, oraz z urządzeń pomocniczych. Tworzywo z zasobnika (*1*) dostaje się pomiędzy tarczę (*2*) i przeciwtarczę (*3*), nagrzewa ciepłem pochodzącym od grzejników (*4*) oraz wskutek tarcia homogenizuje i spręża, przemieszczając się do środka tarczy (*2*) i wypływa na zewnątrz kanałem w dyszy (*5*), współosiowej z tarczą (*2*) i przeciwtarczą (*3*).



Rys. 1.66. Uplastyczniający układ tarczowy: a) schemat; oznaczenia w tekście, b) rysunek pomocniczy do zależności (1.123) [1.5]

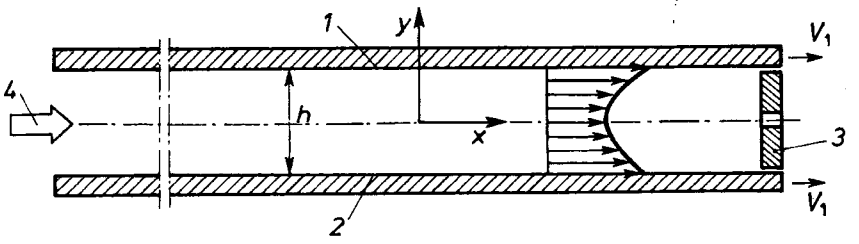
Jeżeli przyjmie się, że tworzywo uplastyczniane jest płynem nieniutonowskim spełniającym model potęgowy o parametrach k oraz n, to moment obrotowy M tarczy układu jest określony zależnością (rys. 1.66b)

$$M = \frac{2\pi k}{n+3}\left(\frac{2\pi v}{b}\right)^n (R^{n+3} - R_0^{n+3}) \tag{1.123}$$

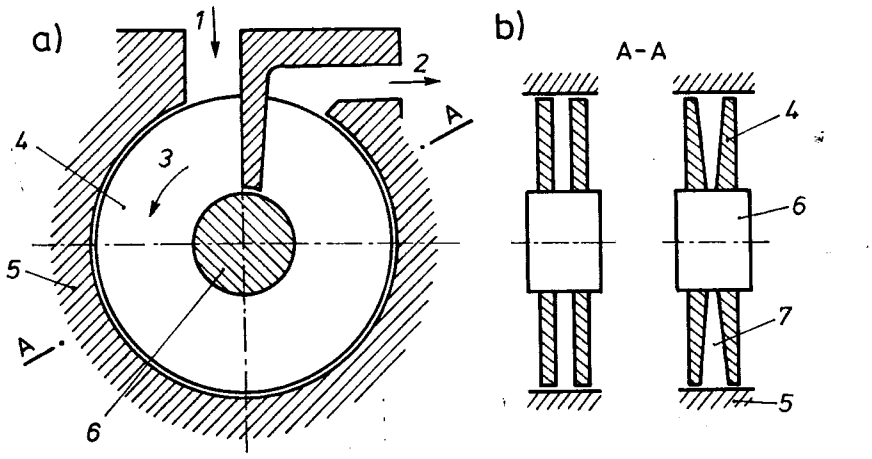
Ten interesujący proces uplastyczniania praktycznie, jak dotychczas, nie zapewnia dużego natężenia przepływu tworzywa i z tego głównie powodu jest stosowany rzadko i tylko do wytłaczania.

Uplastycznianie pierścieniowe

We wszystkich rozwiązaniach uplastyczniania jednoślimakowego przepływ tworzywa w kanale śrubowym układu ślimakowego jest wymuszany przez ruch jednej z powierzchni ograniczającej kanał, tj. powierzchni ślimaka. Ale można obie powierzchnie ograniczające kanał, np. powierzchnię odpowiadającą powierzchni dna kanału oraz powierzchnię odpowiadającą powierzchni wewnętrznej cylindra, wprawić w ruch w tym samym kierunku, co znacznie poprawi rozkład prędkości wypadkowej w przekroju wzdłużnym kanału (rys. 1.67). Koncepcję tę można realizować efektywnie, gdy powierzchniami tymi są dwie zgodnie obracające się tarcze kołowe osadzone na wale, nieco oddalone od siebie, tworzące pomiędzy sobą kanał pierścieniowy (rys. 1.68). Uplastycznianie zachodzące w tym układzie nazywa się więc uplastycznianiem pierścieniowym. Pierwsze wiadomości na temat uplastyczniania pierścieniowego opublikowali Z. Tadmor, P. Hold i L. Valsamis w 1979 r. [1.98].



Rys. 1.67. Schemat przekroju wzdłużnego kanału i rozkład prędkości całkowitej tworzywa w uplastyczniającym układzie pierścieniowym: *1* i *2* — powierzchnie tarcz kołowych, *3* — dysza z kanałem wypływowym, *4* — kierunek wprowadzenia tworzywa do kanału, *h* — odległość między tarczami



Rys. 1.68. Istota uplastyczniającego układu pierścieniowego: a) przekrój w płaszczyźnie tarcz, b) przekroje osiowe; *1* — wprowadzenie tworzywa wejściowego, *2* — wyprowadzenie tworzywa wyjściowego, *3* — kierunek obrotów tarcz, *4* — tarcze, *5* — obudowa nieruchoma, *6* — wał, *7* — kanał pierścieniowy prostokątny lub stożkowy

Prędkość tworzywa v_x w kierunku osi x (rys. 1.67) w funkcji $\xi = 2y/h$ wynosi [1.97, 1.98]

$$v_x(\xi) = V_1 - (1 - \xi^2)\frac{h^2}{8\eta}\left(\frac{dp}{dx}\right) \tag{1.124}$$

a jednostkowe objętościowe natężenie przepływu w, odniesione do jednostki szerokości kanału, jest sumą jednostkowego objętościowego natężenia przepływu wleczonego

w_w i jednostkowego objętościowego natężenia przepływu ciśnieniowego $\dot{w}_c$

$$\dot{w} = \dot{w}_w + \dot{w}_c = V_1 h - \frac{h^3}{12\eta}\left(\frac{dp}{dx}\right) \tag{1.125}$$

natomiast stosunek a jednostkowego objętościowego natężenia przepływu ciśnieniowego do takiego samego natężenia przepływu wleczonego wynosi

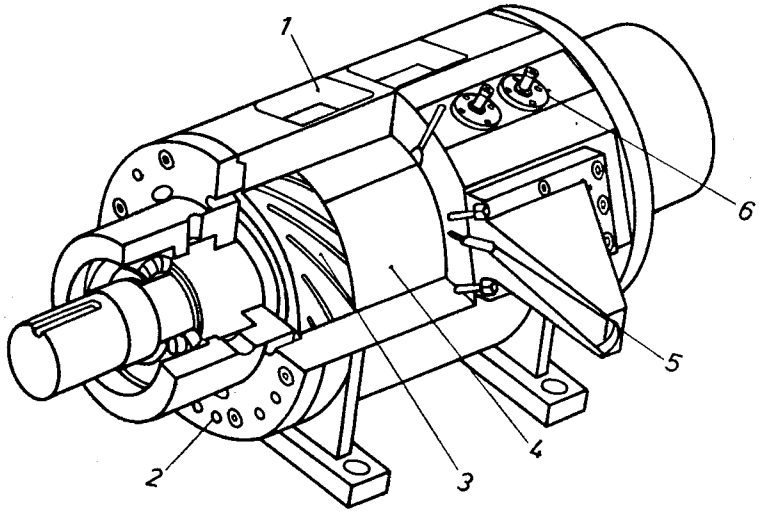
$$a = \frac{\dot{w}_c}{\dot{w}_w} = -\frac{h^2}{12\eta V_1}\left(\frac{dp}{dx}\right) \tag{1.126}$$

Porównując zależność (1.125) ze wzorem (1.55) na objętościowe natężenie przepływu w układzie jednoślimakowym widać, że w warunkach porównywalnych, w układzie pierścieniowym występuje dwukrotnie większe natężenie przepływu wleczonego przy identycznym natężeniu przepływu ciśnieniowego. Większy przepływ wleczony stwarza podstawy do powiększenia natężenia przepływu całkowitego. Należy również zauważyć, że w związku z powyższym stosunek a wyznaczony dla układu pierścieniowego (1.126) jest dwukrotnie mniejszy niż stosunek a wyznaczony dla układu jednoślimakowego (1.79a).

Uplastycznianie pierścieniowe można stosować do wytłaczania (raczej z niezbyt dużym natężeniem przepływu) oraz do innych procesów przetwórstwa. Wytłaczarka pierścieniowa zazwyczaj składa się z kilku pierścieni przetwórczych, np. takich jak pokazano na rys. 1.68, które mogą być łączone szeregowo, równolegle lub mogą tworzyć dowolny układ szeregowo-równoległy. Uplastycznianie pierścieniowe nie znalazło dotychczas szerszego praktycznego zastosowania.

Uplastycznianie wirnikowe

W 1987 r. D. Jones, H. Stripling i S. Flud [1.30] podali informacje o uplastycznianiu za pomocą układu uplastyczniającego, którego zasadniczą częścią jest wirnik kołowy o średnicy zewnętrznej 304,8 mm, obracający się z prędkością obrotową 8,33 s^{-1}, osadzony nieco mimośrodowo w obudowie. Niestety brak jest bliższych danych dotyczących procesu tego uplastyczniania. Uplastycznianie wirnikowe zastosowano w firmie Permian Research (USA) do wytłaczania (rys. 1.69), uzyskując obiecujące wyniki, m.in. stwierdzono możliwość wytłaczania 15 różnych tworzyw termoplastycznych wówczas, gdy są w postaci granulek i proszku.



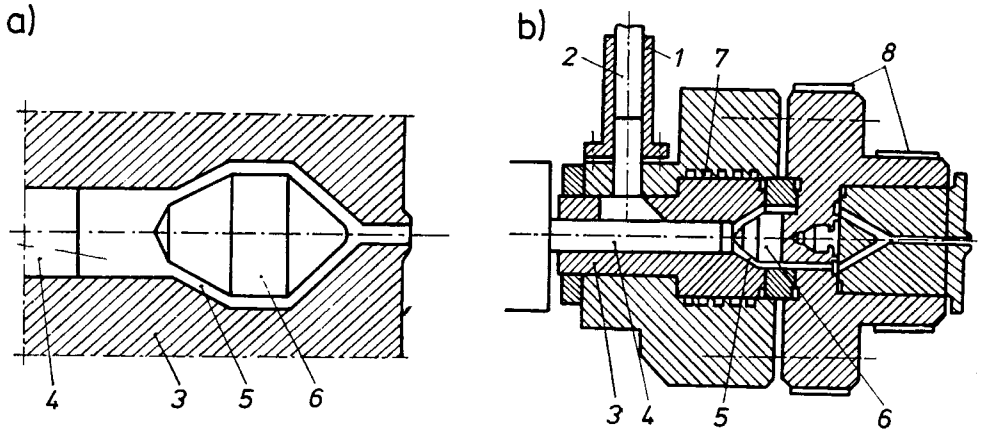
Rys. 1.69. Uplastyczniający układ wirnikowy: *1* — otwór zasypowy, *2* — grzejniki elektryczne, *3* — element kołowy z nacięciami, *4* — wirnik, *5* — dysza wypływowa, *6* — regulatory ciśnienia

1.6.3. Uplastycznianie liniowe i planetarne

W obu metodach uplastycznianie zachodzi głównie pod wpływem ruchu tworzywa, powodującego intensywne tarcie, zwłaszcza wewnętrzne. W pierwszym przypadku tworzywo wykonuje ruch liniowy, w drugim zaś — ruch zbliżony do planetarnego.

Uplastycznianie liniowe

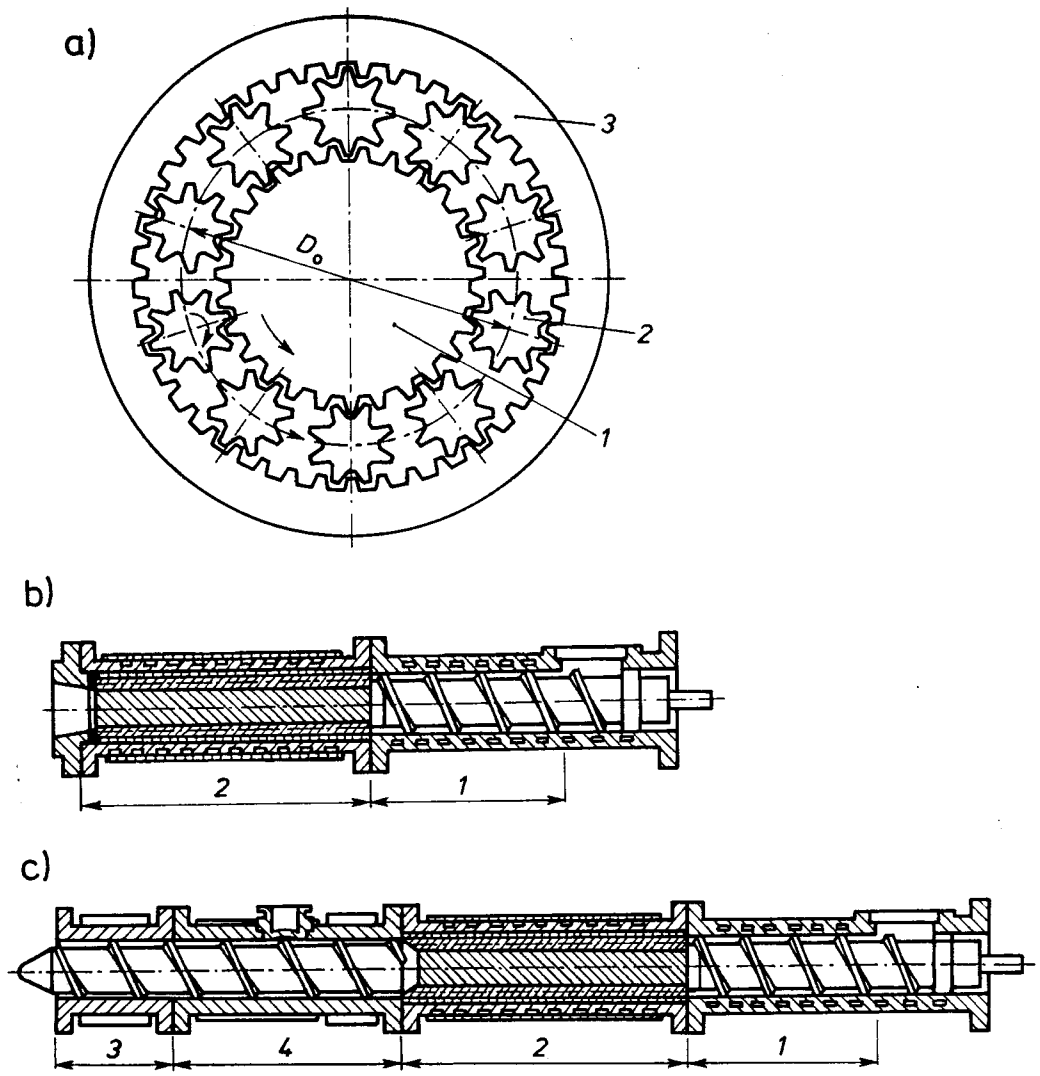
Podczas tego uplastyczniania ciepło generuje się wskutek sprężania tworzywa do osiągnięcia w nim dużego ciśnienia i wskutek tarcia, zwłaszcza wewnętrznego, podczas przepływu liniowego przez wąską szczelinę (rys. 1.70a). Powstające ciepło jest na ogół niewystarczające do nagrzania tworzywa w celu przejścia do zadanego stanu fizycznego, dlatego ogrzewa się cylinder sprężający i szczelinę. Uplastycznianie liniowe zastosowano praktycznie w 1973 r. w Instytucie Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych Wyższej Szkoły Technicznej w Akwizgranie (rys. 1.70b). Tworzywo z zasobnika spada pod wpływem siły ciężkości do cylindra dozującego (*1*), a tłok dozujący (*2*) przemieszcza je do cylindra sprężającego (*3*), gdzie tłok sprężający (*4*) wywiera na nie ciśnienie do 1000 MPa. Tworzywo zostaje sprężone i następnie przepływa przez szczelinę (*5*). Wysokie ciśnienie i złe przewodnictwo cieplne tworzywa sprawiają, że warstwa zewnętrzna tworzywa w bardzo krótkim czasie osiąga temperaturę topnienia. Warstwa stopionego tworzywa zmniejsza tarcie między tworzywem i materiałem cylindra oraz ułatwia przepływ. Właściwe uplastycznianie zachodzi w ciągu ułamka sekundy w samej szczelinie. Ciśnienie można obniżyć podwyższając temperaturę cylindra i szczeliny, jak również podgrzewając wstępnie tworzywo. Wysokie ciśnienie może prowadzić do zmian w strukturze tworzywa, np. w przypadku polietylenu zauważono skłonność do sieciowania, a w przypadku poliwęglanu — do krystalizacji wtórnej.



Rys. 1.70. Uplastycznianie liniowe: a) istota, b) układ uplastyczniający; *1* — cylinder dozujący, *2* — tłok dozujący, *3* — cylinder sprężający, *4* — tłok sprężający, *5* — szczelina, *6* — element tworzący szczelinę, *7* — ogrzewanie cieczowe, *8* — ogrzewanie elektryczne [1.13, 1.49]

Uplastycznianie planetarne

Podczas tego uplastyczniania występuje ruch obrotowy ślimaka centralnego i ruch ślimaków planetarnych zazębiających się ze ślimakiem centralnym, ale nie zazębiających się ze sobą (p. 1.2.3). Tworzywo uplastyczniane jest poddawane bardzo złożonym przepływom, dającym się jednak podzielić na dwa rodzaje: przepływ tworzywa pomiędzy



Rys. 1.71. Uplastycznianie ślimakowo-planetarne: a) przekrój poprzeczny przez układ planetarny; *1* — ślimak centralny, *2* — ślimaki planetarne, *3* — cylinder, b) przekrój wzdłużny w rozwiązaniu klasycznym; *1* — układ jednoślimakowy uplastyczniania wstępnego (3*D*), *2* — układ planetarny uplastyczniania ostatecznego, c) przekrój wzdłużny w rozwiązaniu nieklasycznym; *1* — układ jednoślimakowy uplastyczniania wstępnego (3*D*), *2* — układ planetarny uplastyczniania zasadniczego (3÷6*D*), *3* — układ jednoślimakowy uplastyczniania wykańczającego, *4* — układ jednoślimakowy odgazowujący [1.2, 1.25]

ślimakami planetarnymi — zbliżony do śrubowego w obszarze powierzchni walcowej o średnicy średniej D_0 (rys. 1.71a) i coraz bardziej zniekształcanego w miarę oddalania się od niej w obie strony oraz przepływ w obszarach zazębiania się ślimaków planetarnych ze ślimakiem centralnym i ślimaków planetarnych z uzębionym cylindrem. W rezultacie intensywnych przepływów generuje się duża ilość ciepła, ale niewystarczająca do procesu uplastyczniania, konieczne jest więc stosowanie grzejników mocowanych na cylindrze. Uplastyczniania planetarnego nie stosuje się samodzielnie, lecz łączy się je z uplastycznianiem ślimakowym szeregowo (rys. 1.71b oraz c) bądź rzadziej kaskadowo. Uplastycznianie ślimakowo-planetarne i planetarno-kaskadowe stosuje się przede wszystkim do PVC w celu otrzymywania plastyfikatu zasilającego kalander. Masowe natężenie przepływu tworzywa w procesach wymienionego uplastyczniania dochodzi do 1 kg/s = 3600 kg/h. W czasie uplastyczniania zachodzi dość szybkie zużywanie się

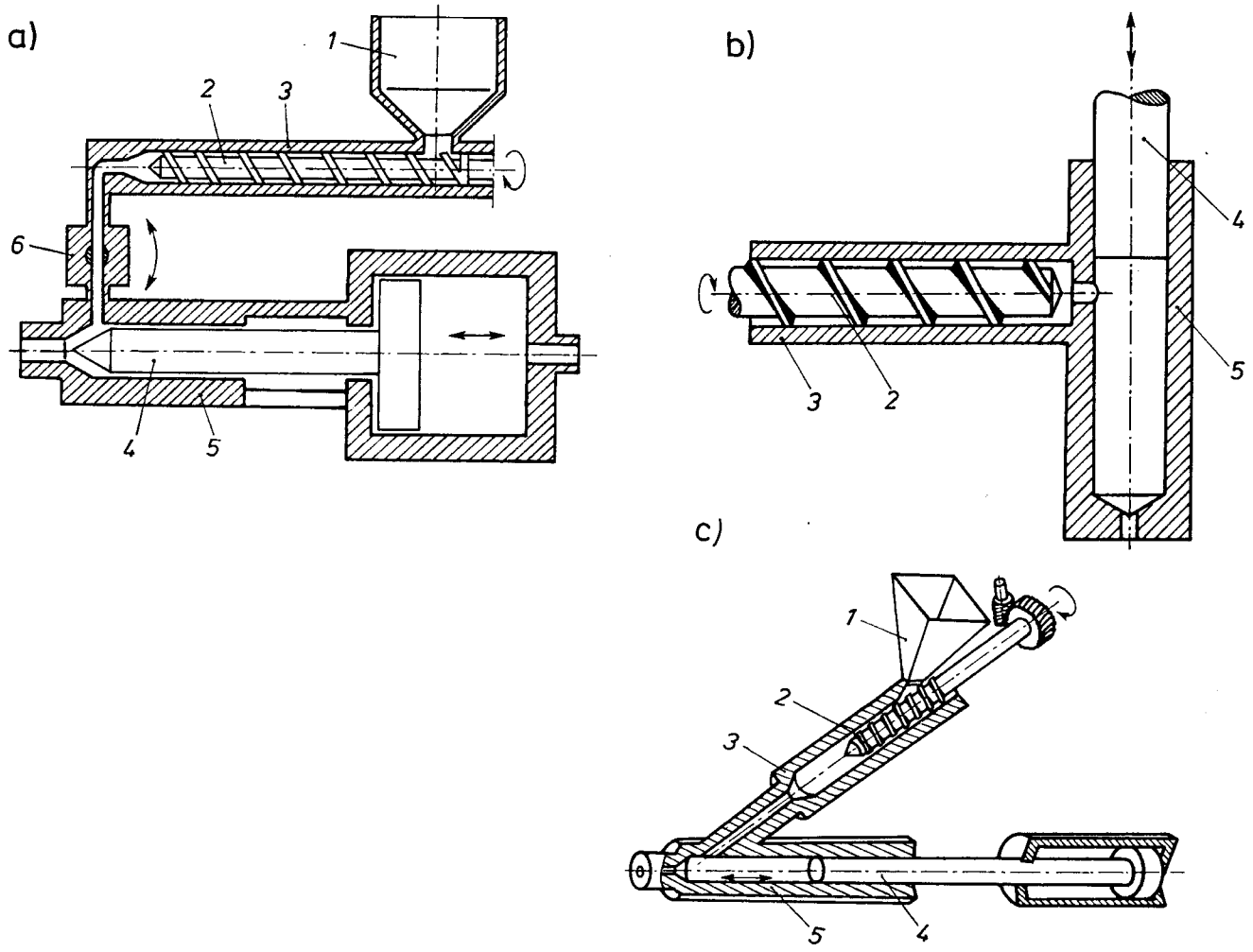
uzębienia ślimaków i uzębienia cylindra, co stanowi bodaj najważniejszą wadę i co powoduje wypieranie tego uplastyczniania przez uplastycznianie dwuślimakowe.

1.7. Uplastycznianie mieszane

Istotą uplastyczniania mieszanego jest to, że tworzywo uplastycznia się wstępnie w układzie ślimakowym i, bezpośrednio po tym, uplastycznia się ostatecznie w układzie beźślimakowym bądź rzadziej — odwrotnie. Największe znaczenie ma uplastycznianie ślimakowo-tłokowe i ślimakowo-tarczowe.

Uplastycznianie ślimakowo-tłokowe

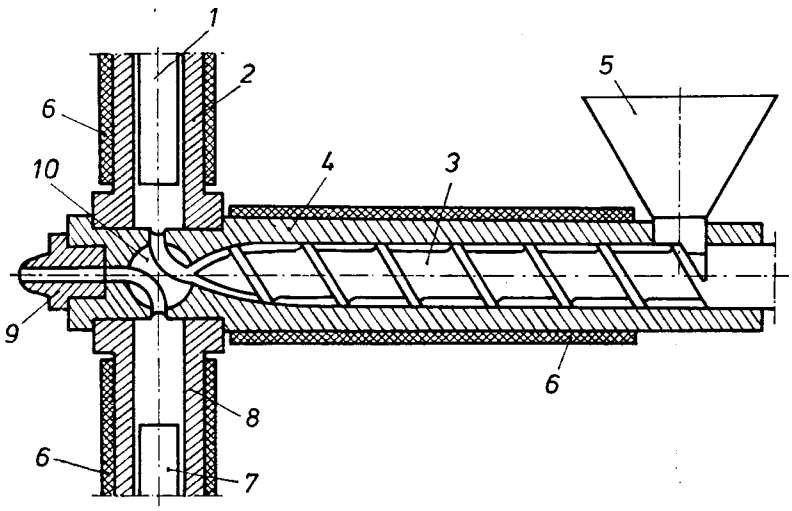
Uplastycznianie to ma wiele odmian. Na rysunku 1.72a przedstawiono przykładowo jedno z rozwiązań konstrukcyjnych układu ślimakowo-tłokowego równoległego. Tworzywo uplastycznia się wstępnie w układzie jednoślimakowym, skąd jest doprowadzane pod wytworzonym ciśnieniem do układu tłokowego uplastyczniania ostatecznego, z którego jest już — przy ciągle obracającym się ślimaku — bezpośrednio wtryskiwane. Przed cofaniem się tworzywa do układu jednoślimakowego w czasie wtryskiwania zabezpiecza prosty zawór odcinający, umiejscowiony pomiędzy układami. Z kolei na rys. 1.72b pokazano przykładowo układ ślimakowo-tłokowy prostopadły do kierunku wtrys-



Rys. 1.72. Uplastyczniający układ ślimakowo-tłokowy: a) równoległy, b) prostopadły, c) kątowy; *1* — zasobnik, *2* — ślimak, *3* — cylinder układu ślimakowego, *4* — tłok, *5* — cylinder układu tłokowego, *6* — zawór odcinający (na rysunku nie pokazano grzejników)

kiwania, bez zaworu. Modyfikacją tych rozwiązań jest pochylenie jednego z układów względem drugiego, np. układu ślimakowego (rys. 1.72c). Dzięki temu uzyskuje się znaczne skrócenie drogi i zmniejszenie oporów przepływu tworzywa podczas przechodzenia z jednego układu do drugiego.

Inne rozwiązanie konstrukcyjne układu ślimakowo-tłokowego pokazano na rys. 1.73. Układ ten składa się z układu jednoślimakowego i z dwóch bliźniaczych układów tłokowych, ułożonych prostopadle do niego w jednej osi, jak pokazano na rysunku. Tworzywo zostaje wstępnie uplastycznione w układzie jednoślimakowym i przemieszczone pod wytworzonym ciśnieniem do jednego z układów tłokowych, przy ruchu tłoka w kierunku zaworu rozdzielającego. Następnie, przy ciągłym ruchu obrotowym ślimaka, obraca się szybko rozdzielacz w zaworze i tworzywo przemieszcza się do drugiego układu tłokowego. W tym czasie tworzywo z pierwszego układu zostaje pod ciśnieniem za pomocą tłoka transportowane przez zawór i dyszę do narzędzia. W czasie tego transportowania jest ostatecznie uplastyczniane. Następnie opisany cykl się powtarza. Przedstawiony układ charakteryzuje się dużym natężeniem przepływu tworzywa przy stosunkowo małych rozmiarach. Stosowany może być zarówno do wytłaczania, jak i do wtryskiwania.

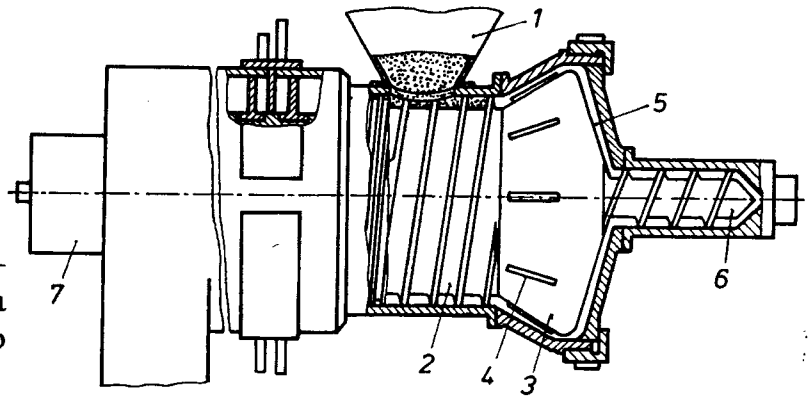


Rys. 1.73. Uplastyczniający układ ślimakowo-dwutłokowy: *1* i *7* — tłoki bliźniacze, *2* i *8* — cylindry układów tłokowych, *3* — ślimak, *4* — cylinder układu ślimakowego, *5* — zasobnik, *6* — grzejniki, *9* — dysza, *10* — zawór rozdzielający

Uplastycznianie ślimakowo-tarczowe

Aby zwiększyć efektywność uplastyczniania tarczowego, łączy się je z uplastycznianiem ślimakowym. Na ogół uplastycznianie ślimakowo-tarczowe odbywa się w trzech następujących po sobie obszarach układu uplastyczniającego: ślimakowe uplastycznianie wstępne, tarczowe uplastycznianie zasadnicze i ślimakowe uplastyczniane ostateczne. Uplastycznianie ślimakowo-tarczowe może być realizowane przede wszystkim jako liniowe i jako kątowe.

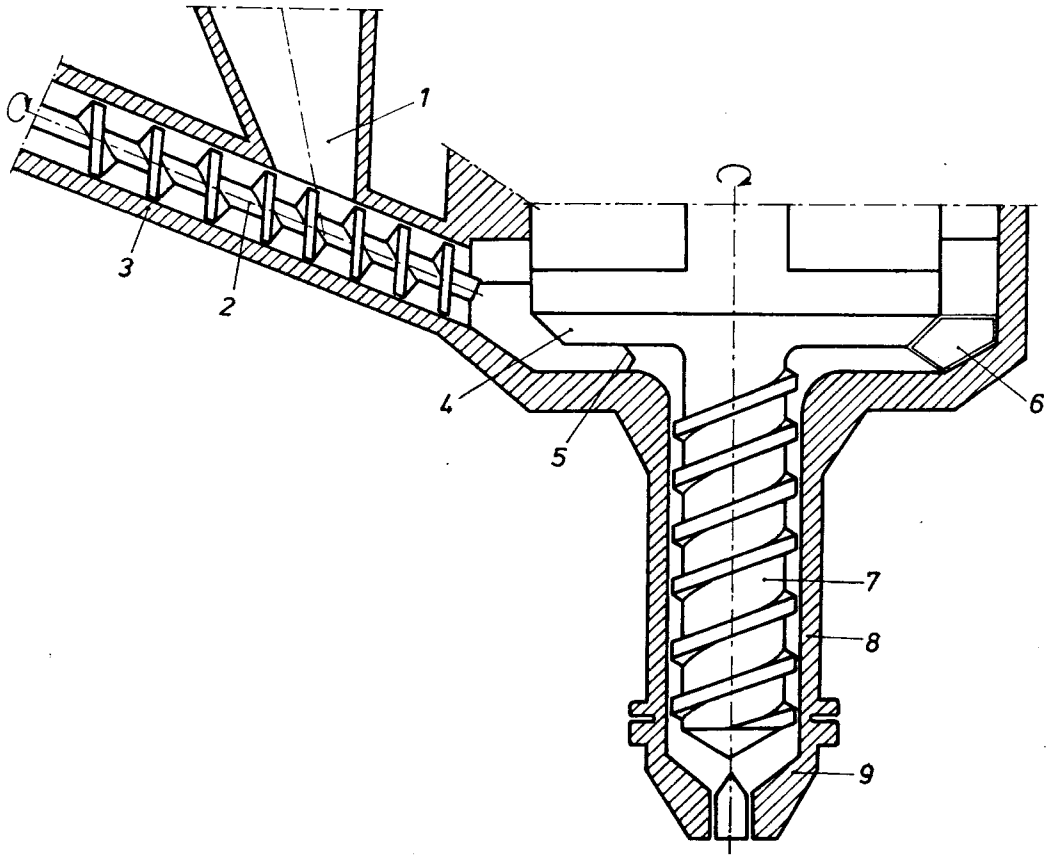
Na rysunku 1.74 przedstawiono jedno z rozwiązań konstrukcyjnych uplastyczniającego układu ślimakowo-tarczowego liniowego. Tworzywo z zasobnika (*1*) spada pod wpływem siły ciężkości do układu jednoślimakowego uplastyczniania wstępnego, charakteryzującego się ślimakiem (*2*) o dużej średnicy D, bardzo małym stosunku L/D i bardzo małym



Rys. 1.74. Uplastyczniający układ ślimakowo-tarczowy liniowy: oznaczenia w tekście, na rysunku nie zaznaczono grzejników [1.55]

skoku, którego zasadniczymi funkcjami są sprężanie i transportowanie. Następnie tworzywo przemieszcza się pod działaniem wytworzonego ciśnienia do układu tarczowego, w którym tarcza (*3*) ma przegrody obwodowe (*4*), ułatwiające przejście tworzywa do szczeliny tarczowej (*5*), gdzie odbywa się uplastycznianie zasadnicze z wykorzystaniem efektu Weissenberga. Z kolei tworzywo przemieszcza się do układu jednoślimakowego uplastyczniania ostatecznego ze ślimakiem (*6*) o typowych elementach geometrycznych, lecz małym stosunku L/D. Jeżeli układ ten ma być stosowany do wtryskiwania, to ślimak (*6*) w czasie procesu wtryskiwania wykonuje również ruch postępowo-zwrotny, napędzany hydraulicznie (*7*).

Układ ślimakowo-tarczowy kątowy jest pokazany na rys. 1.75. Działanie układu wynika z rysunku. W układzie tarczowym nie zachodzi klasyczny efekt Weissenberga,



Rys. 1.75. Uplastyczniający układ ślimakowo-tarczowy kątowy: *1* — zasobnik, *2* — ślimak uplastyczniania wstępnego, *3* — cylinder uplastyczniania wstępnego, *4* — tarcza uplastyczniania zasadniczego, *5* — wyprofilowania tarczy, *6* — zgarniacz tworzywa, *7* — ślimak uplastyczniania ostatecznego, *8* — cylinder uplastyczniania ostatecznego, *9* — dysza [1.68]

gdyż szczelina tarczowa jest dość szeroka, a tarcza jest zaopatrzona w wyprofilowania (5) i zgarniacz tworzywa (6). Układ stosuje się do wytłaczania.

1.8. Ocena efektywności procesu uplastyczniania

Ocenę efektywności procesu uplastyczniania można prowadzić według dwóch grup wskaźników: bezpośrednich i pośrednich.

1.8.1. Wskaźniki bezpośrednie

Wskaźniki bezpośrednie obejmują wielkości fizyczne charakteryzujące proces uplastyczniania z punktu widzenia globalnego i stabilności. Są to przede wszystkim takie wielkości, jak:

— *natężenie przepływu tworzywa* — wydajność (objętościowa lub masowa),

— *właściwości fizyczne tworzywa* opuszczającego układ uplastyczniający,

— *zużycie energii*, zwłaszcza odniesione do jednostki masy tworzywa opuszczającego układ (jednostkowe zużycie energii),

— *rozkład ciśnienia i temperatury tworzywa* wzdłuż długości układu uplastyczniającego,

— *rozkład względnej szerokości obszaru tworzywa* w stanie stałym wzdłuż długości strefy przemiany układu jednoślimakowego,

— *pojemność skokowa* (tylko w przypadku wtryskiwania).

Wielkości te były już poprzednio w większości zdefiniowane i omawiane; można je mierzyć bezpośrednio w procesie uplastyczniania bądź wymagają prostych przeliczeń wielkości mierzonych.

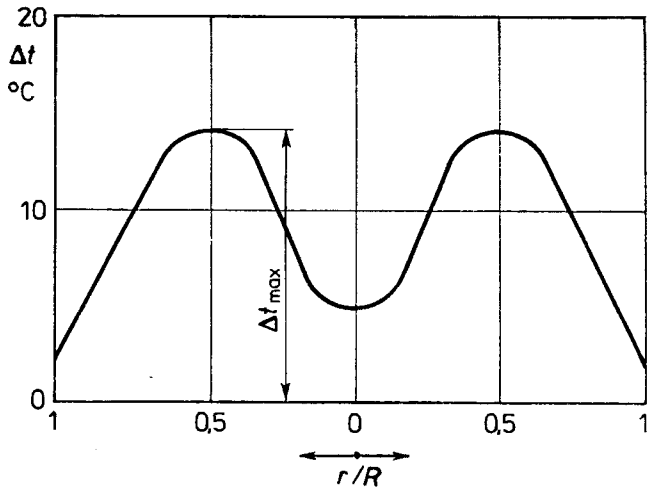
1.8.2. Wskaźniki pośrednie

Wskaźniki pośrednie obejmują wielkości fizyczne charakteryzujące proces uplastyczniania z punktu widzenia szczegółowego i niestabilności. Są to głównie następujące wielkości: *fluktuacja temperatury tworzywa, pulsacja ciśnienia i natężenia przepływu tworzywa, ujednorodnienie cieplne i wymieszanie tworzywa*. Niektóre z tych wielkości były już poprzednio sygnalizowane.

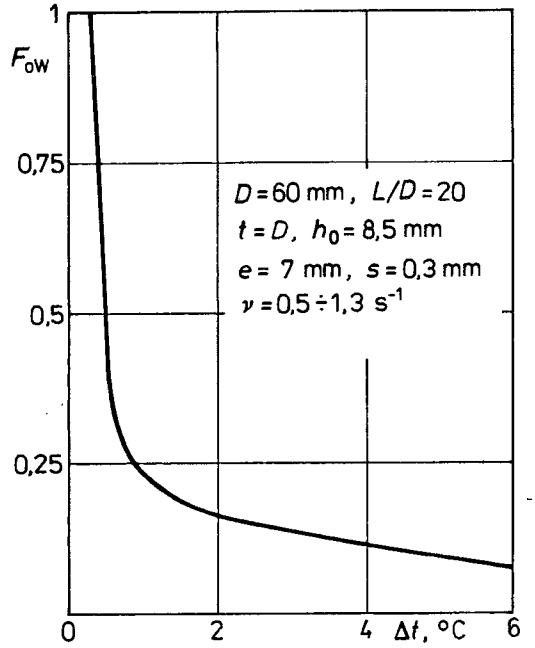
Fluktuacja temperatury

Wahania temperatury tworzywa o określonym okresie i danej amplitudzie noszą nazwę fluktuacji temperatury. Rozróżnia się *fluktuacje krótkookresową i długookresową*. Są one niezależne od siebie. Fluktuacja krótkookresowa chrakteryzuje się okresem około 1 sekundy i amplitudą do kilkunastu kelwinów, natomiast fluktuacja długookresowa — okresem od kilku minut do godziny i amplitudą również do kilkunastu kelwinów. Fizyka obu fluktuacji nie jest jeszcze wystarczająco wyjaśniona.

Fluktuacja krótkookresowa należy do podstawowych miar poprawności procesu uplastyczniania. Zauważono, że dla danego tworzywa powiększa się ona ze wzrostem głębokości kanału w strefie dozowania układu jednoślimakowego i natężenia prze-



Rys. 1.76. Fluktuacja krótkookresowa Δt temperatury PE-LD; Δt_{max} — największe odchylenie temperatury w przekroju poprzecznym kanału kołowego dyszy cylindra o promieniu R, gdzie $r/R = 0{,}5$ [1.4]



Rys. 1.77. Zależność wskaźnika Squiresa i Wolfa F_{ow} od fluktuacji krótkookresowej Δt polietylenu o dużej gęstości w jednoślimakowym układzie uplastyczniającym ze ślimakiem klasycznym [1.105]

pływu tworzywa, a zmniejsza się ze wzrostem długości strefy dozowania; jest inna w różnych punktach przekroju poprzecznego kanału. Elementarnym wskaźnikiem fluktuacji krótkookresowej jest odchylenie temperatury w kanale dyszy przy opuszczaniu układu (rys. 1.76). Bardziej kompleksową ocenę tej fluktuacji przeprowadza się, od początku lat siedemdziesiątych, za pomocą bezwymiarowego wskaźnika P. Squiresa i C. Wolfa [1.95], którym jest pewna właściwa warunkom uplastyczniania postać liczby Fouriera

$$F_{ow} = \frac{aD}{\dot{W}} \sum_{i=1}^{k} \frac{L_i}{h_i} \tag{1.127}$$

gdzie a oznacza dyfuzyjność cieplną tworzywa, D — średnicę zewnętrzną ślimaka, $\dot{W}$ — objętościowe natężenie przepływu tworzywa, L_i — długość i-tej strefy ślimaka, h_i — średnią głębokość kanału w i-tej strefie, k — liczbę stref, i — numer kolejny strefy; $i = 1,...,k$. Małym wartościom F_{ow} odpowiadają duże wartości odchylenia temperatury (rys. 1.77). Inny, nowszy wskaźnik bezwymiarowy, z końca lat osiemdziesiątych [1.108], ma postać

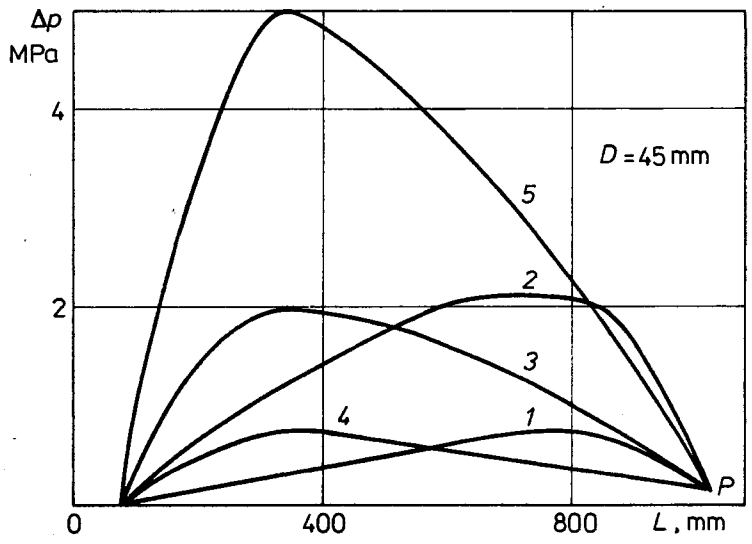
$$K_J = \int_{L'}^{L} a \frac{dz}{h^2 v_s} \tag{1.128}$$

gdzie L', L oznaczają granice całkowania wzdłuż długości kanału ślimaka, L' — odległość punktu rozpoczęcia uplastyczniania od początku kanału, L — długość kanału, dz — przyrost elementarny w kierunku długości kanału, v_s — średnią prędkość przepływu tworzywa. Małe wartości K_J odpowiadają dużym wartościom amplitudy fluktuacji.

Fluktuacja długookresowa wynika głównie z rozrzutu właściwości tworzywa, strumienia ciepła dostarczanego z grzejników i prędkości obrotowej ślimaka. Są to więc rozrzuty nieuchronne. Ograniczenie tej fluktuacji polega na zmniejszaniu różnymi sposobami rozrzutu wymienionych wielkości, np. poprzez zachowanie stałych wartości parametrów prądu elektrycznego zasilającego grzejniki i silnik napędowy układu oraz wskutek stosowania kaskadowej regulacji temperatury.

Pulsacja ciśnienia i natężenia przepływu

Wahania ciśnienia tworzywa o amplitudzie do kilku megapaskali noszą nazwę pulsacji ciśnienia. Ponieważ pulsacja wynika z istoty procesu uplastyczniania [1.18], jest ona nieuchronna. Zależy przede wszystkim od właściwości tworzywa, rozwiązania konstrukcyjnego układu uplastyczniającego i prędkości obrotowej ślimaka. Na ogół dla danego tworzywa rośnie wzdłuż długości strefy zasilania układu jednoślimakowego, następnie maleje, osiągając wartości dość małe na końcu strefy dozowania. Podstawowym wskaźnikiem pulsacji ciśnienia jest amplituda ciśnienia (rys. 1.78). Pulsacja ciśnienia



Rys. 1.78. Pulsacja Δp ciśnienia PE-LD (Politen II 003/GO) wzdłuż długości L uplastyczniającego układu jednoślimakowego w porównywalnych warunkach (D = 45 mm) dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych ślimaka: *1* i *3* — ślimak klasyczny, *2* i *4* — ślimak niekonwencjonalny, *2* i *5* — ślimak specjalny, *1*, *2* — v = 0,67 s^{-1}, *3*, *4*, *5* — v = 3,33 s^{-1} [1.75]

powoduje głównie pulsację natężenia przepływu (wydajności) — p. 1.5.1, a ta z kolei należy do najważniejszych miar poprawności procesu uplastyczniania.

Elementarnym wskaźnikiem pulsacji natężenia przepływu tworzywa jest amplituda tej pulsacji. Bardziej złożony wskaźnik pulsacji natężenia przepływu sformułował w 1962 r. R. Kirby [1.33]. W warunkach izotermicznego wytłaczania za pomocą układu jednoślimakowego tworzywa traktowanego jako płyn niutonowski, przy $h = \text{const}$, wskaźnik Kirby'ego ma postać

$$\frac{1}{\Delta \dot{W}} \frac{\mathrm{d}\dot{W}}{\mathrm{d}T} = \frac{1}{F} \frac{AKCv}{(KL_k + C)^2} \tag{1.129}$$

gdzie A oraz C oznaczają stałe geometryczne ślimaka (odpowiednio w m^3 oraz w m^4), F — przekrój poprzeczny kanału ślimaka w strefie dozowania, L_k — długość kanału w strefie dozowania. Wskaźnik ten został rozwinięty przez R. Tornera [1.101] w odniesieniu do politropowego wytłaczania płynu spełniającego model potęgowy. M. Stevens [1.94], przyjmując takie same założenia co R. Kirby, zmodyfikował wskaźnik pulsacji natężenia przepływu do postaci

$$\frac{1}{\dot{W}} \frac{\mathrm{d}\dot{W}}{\mathrm{d}T} = \frac{C}{L_k(KL_k + C)} \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}T} \tag{1.130}$$

Większe wartości przedstawionych wskaźników odnoszą się do większej pulsacji natężenia przepływu.

Ujednorodnienie cieplne

W przekroju poprzecznym kanału układu uplastyczniającego plastyczne lub ciekłe tworzywo wykazuje niejednakową temperaturę — jej wartość waha się, w zależności od miejsca pomiaru, na ogół w granicach do 20 kelwinów, ale mogą być wahania większe — do 40 kelwinów [1.3, 1.82]. Wahania te są miarą ujednorodnienia cieplnego tworzywa i stanowią element jego zhomogenizowania. Zazwyczaj określa się je w kanale dyszy przy opuszczaniu układu uplastyczniającego (rys. 1.79).

Wymieszanie

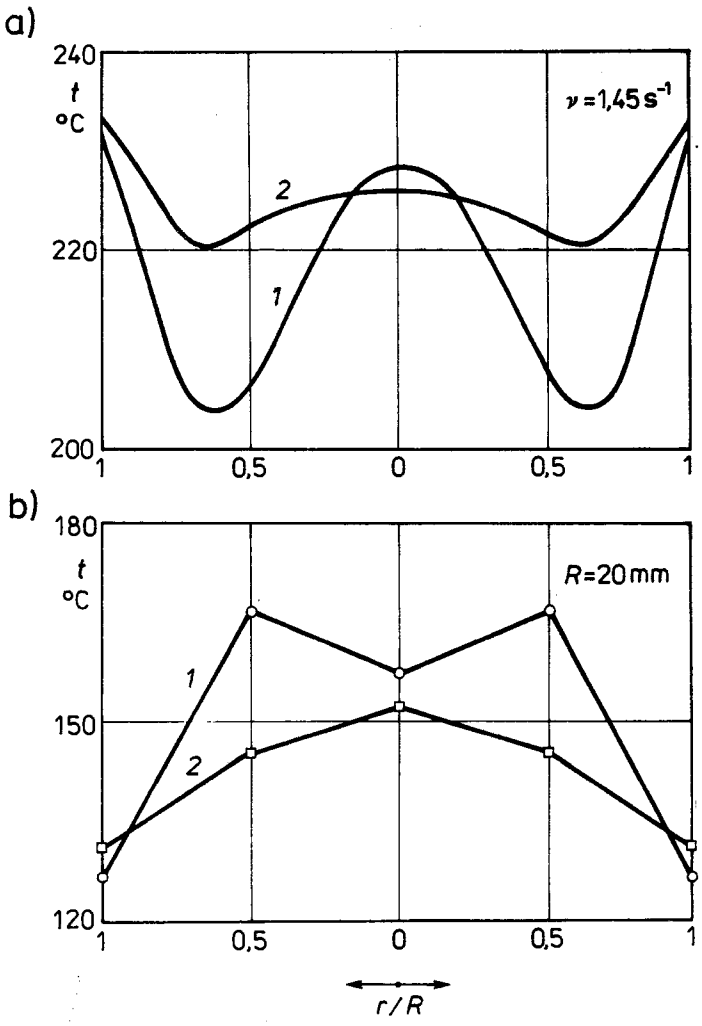
Wymieszanie, zwane również ujednorodnieniem mechanicznym, polega na ujednoliceniu składu tworzywa (polimer, napełniacz proszkowy, plastyfikator, pigment itp.) i stanowi element zhomogenizowania tworzywa, będący efektem procesu mieszania. Mieszanie odbywające się w układach uplastyczniających dzieli się tradycyjnie na mieszanie ścinające i rozprowadzające, ale niektórzy autorzy [1.66] wyróżniają jeszcze mieszanie ogólne.

Mieszanie ścinające odbywa się poprzez pokonanie sił spójności cząstek mieszanych pod wpływem naprężenia ścinającego występującego w otaczającym płynie. Prowadzi ono do rozdrobnienia cząstek. Wskaźnikiem tego mieszania jest średnie naprężenie ścinające $\bar{\tau}$ wyznaczone ze wzoru [1.108]

$$\bar{\tau} = \left(\frac{\dot{N}_u \bar{\eta}}{\dot{W} \bar{t}_r} \right)^{0,5} \tag{1.131}$$

gdzie $\dot{N}_u$ oznacza moc napędu ślimaka, $\bar{\eta}$ — lepkość średnią tworzywa, $\bar{t}_r$ — średni czas przebywania tworzywa w układzie.

Istota *mieszania rozprowadzającego* polega na zmniejszaniu różnicy składu tworzywa w różnych jego miejscach. Miarą rozprowadzania jest odległość dwóch cząstek tworzywa



Rys. 1.79. Rozkład temperatury t tworzywa w przekroju poprzecznym kanału kołowego dyszy cylindra o promieniu R w przypadku: a) PE-LD przy temperaturze cylindra 232°C; *1* — ślimak klasyczny, *2* — ślimak niekonwencjonalny z elementami intensywnego mieszania [1.3], b) PVC przy temperaturze cylindra 147°C; *1* — $\nu = 0{,}18\ s^{-1}$, *2* — $\nu = 0{,}3\ s^{-1}$ [1.83]

początkowo sąsiadujących ze sobą, które podczas mieszania oddalają się od siebie. Ze względu na małe liczby Reynoldsa, przepływ tworzywa w układzie uplastyczniającym jest przepływem laminarnym, zatem za miarę rozprowadzania można przyjąć całkowite odkształcenie ścinające tworzywa

$$\gamma = \dot{\gamma} T \tag{1.132}$$

G. Schenkel w 1970 r. [1.70] za miarę wymieszania uznał odkształcenie całkowite cząstki tworzywa umieszczonej na wysokości 2/3 głębokości kanału ślimaka w strefie dozowania, liczonej od powierzchni cylindra (rys. 1.42). Cząstka ta, zwana *cząstką kontrolną*, ma najkrótszy ze wszystkich czas przebywania w układzie. Wskaźnik G. Schenkla, w przypadku gdy proces jest izotermiczny, a tworzywo płynem spełniającym model potęgowy oraz przy $D = h$, ma postać

$$\gamma = 3{,}71 \frac{L}{h} \frac{1{,}64 + a}{1 - a} \tag{1.133}$$

natomiast czas przebywania cząstki w układzie określa wzór

$$T_c = \frac{2{,}3}{1 - a} \frac{L}{\pi D v} \tag{1.134}$$

w którym L oznacza długość strefy dozowania, $a = \dot{W}_c / \dot{W}_w$ (1.79). Wymieszanie szacuje się jako dobre, gdy $2000 < \gamma < 3000$ [1.10]. G. Pinto i Z. Tadmor [1.64] wprowadzili do

oceny mieszania rozprowadzającego średnie odkształcenie ścinające, jakiemu podlegają przepływające cząstki tworzywa. Okazało się jednak, że lepszą zgodność z doświadczeniem osiągano stosując wskaźnik G. Schenkla.

W przypadku uplastyczniających układów dwuślimakowych ocena wymieszania jest bardziej złożona, można na przykład stosować [1.12] wskaźnik ujmujący rozkład naprężenia stycznego w tworzywie znajdującym się w kanale.

1.9. Przykłady obliczeniowe

Przykład 1.1. Wyznaczyć głębokość kanału śrubowego, strefy zasilania o długości $L = 540$ mm, układu uplastyczniającego wytłaczarki jednoślimakowej do wytłaczania PE-LD. Tworzywo ma gęstość $\rho = 950$ kg/m^3, gęstość nasypową $\rho_n = 480$ kg/m^3, ciśnienie tworzywa w strefie zasypu wynosi $p_z = 100$ Pa, a na końcu strefy zasilania $p_k = 30$ MPa, głębokość kanału w strefie dozowania układu uplastyczniającego $h_d = 10$ mm.

Rozwiązanie: Głębokość kanału w dowolnej odległości od początku strefy zasilania wyznacza się ze wzoru (1.46). Aby z niego skorzystać, należy znać stałe c oraz u; odczytane z tabl. 1.3 (s. 45) wynoszą one

$$c = 7{,}1 \cdot 10^{-6}; \qquad u = 6$$

Dla $l = 0$, czyli na początku strefy zasilania, głębokość kanału można również wyznaczyć ze wzoru (1.47); po podstawieniu danych liczbowych otrzymuje się

$$h_0 = 10 \frac{950}{480} = 19{,}79 \text{ mm}$$

Dla $l > 0$ stosuje się już tylko wzór (1.46); i tak np. dla $l = 180$ mm, po podstawieniu danych otrzymuje się

$$h = 19{,}79 \left[1 - 7{,}1 \cdot 10^{-6} \left(\frac{180}{540} \lg \frac{30 \cdot 10^6}{100} \right)^6 \right] = 19{,}78 \text{ mm}$$

Dla innych wartości l obliczenia przeprowadza się analogicznie. Wyniki obliczeń dla sześciu wybranych wartości l zestawiono w tabl. 1.5.

Tablica 1.5

Wyniki obliczeń głębokości kanału śrubowego w strefie zasilania

l, mm	0	180	270	360	450	540
h, mm	19,79	19,78	19,73	19,46	18,52	16,00

Przykład 1.2. W układzie jednoślimakowym jest uplastyczniany PE-LD w temperaturze w strefie dozowania wynoszącej $t = 235$°C, ciśnienie na końcu strefy dozowania wynosi $p_2 = 12{,}9$ MPa dla liczby obrotów ślimaka $v = 0{,}5$ s^{-1} oraz $p_2 = 19{,}4$ MPa dla liczby obrotów ślimaka $v = 1{,}0$ s^{-1}. Elementy geometryczne klasycznej strefy dozowania są następujące: średnica zewnętrzna ślimaka $D = 60$ mm, długość $L = 4{,}5\ D$, skok linii śrubowej $t = D$, szerokość grzbietu zwoju $e = 4{,}5$ mm, głębokość kanału na końcu strefy dozowania $h_2 = 3$ mm, głębokość na początku strefy

$h_1 = 9$ mm, szczelina pomiędzy grzbietem zwoju a powierzchnią wewnętrzną cylindra $s = 0{,}12$ mm. Obliczyć objętościowe i masowe natężenie wypływu tworzywa.

Rozwiązanie: Objętościowe natężenie wypływu tworzywa z układu można w tym przypadku obliczyć z zależności (1.77). Należy znaleźć wartości liczbowe D_s, α_s, Δp oraz η, gdyż pozostałe wartości są bezpośrednio podane w treści zadania.

Średnice średnie D_s wynoszą na początku i na końcu strefy dozowania

$$D_{s1} = \frac{D + D_{r1}}{2} \quad \text{oraz} \quad D_{s2} = \frac{D + D_{r2}}{2}$$

natomiast średnie średnice rdzenia D_r odpowiednio

$$D_{r1} = D - 2h_1 \quad \text{oraz} \quad D_{r2} = D - 2h_2$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymuje się $D_{r1} = 42$ mm i $D_{r2} = 54$ mm, jak również $D_{s1} = 51$ mm i $D_{s2} = 57$ mm.

Z zależności (1.60) wynika, że

$$\operatorname{tg} \alpha_{s1} = \frac{t}{\pi D_{s1}} \quad \text{oraz} \quad \operatorname{tg} \alpha_{s2} = \frac{t}{\pi D_{s2}}$$

a po podstawieniu danych liczbowych $\alpha_{s1} = 19°29'$ oraz $\alpha_{s2} = 18°32'$.

Biorąc pod uwagę objętościowe natężenie przepływu ciśnieniowego, można napisać, przyjmując ciągłość przepływu ciśnieniowego i niezmienność lepkości dynamicznej, że

$$\dot{W}_c = \frac{\pi D_{s1} h_1^3 \sin^2 \alpha_{s1}}{12 L \eta} p_1$$

oraz

$$\dot{W}_c = \frac{\pi D_{s2} h_2^3 \sin^2 \alpha_{s2}}{12 L \eta} p_2$$

Dzieląc stronami oba równania otrzymuje się

$$p_1 = \frac{D_{s2} \sin^2 \alpha_{s2}}{D_{s1} \sin^2 \alpha_{s1}} \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3 p_2$$

a po podstawieniu danych liczbowych

$$p_1 = \frac{57 \cdot 0{,}1011}{51 \cdot 0{,}1113} \left(\frac{3}{9}\right)^3 p_2 = 0{,}0376\, p_2$$

Spadek ciśnienia w strefie dozowania wynosi więc

$$\Delta p = p_2 - p_1 = p_2 - 0{,}0376\, p_2 = 0{,}9624\, p_2$$

Jeżeli przyjmie się uproszczenie, że $\alpha_{s1} = \alpha_{s2}$ oraz $D_{s1} = D_{s2}$, to spadek ciśnienia wyniesie [1.73]

$$\Delta p = 0{,}963\, p_2$$

Lepkość dynamiczna zależy głównie od temperatury tworzywa i prędkości jego ścinania w strefie dozowania. Temperatura jest określona warunkami zadania, natomiast prędkość ścinania jest funkcją prędkości obwodowej V_r powierzchni rdzenia ślimaka na końcu strefy. Zatem prędkość ścinania przy powierzchni rdzenia można z wystarczającym przybliżeniem określić z następującej zależności:

$$\dot{\gamma} = \frac{V_r}{h_2} = \frac{\pi (D_{s2} - 2h_2) v}{h_2}$$

Po podstawieniu danych liczbowych otrzymuje się

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi (60 - 2 \cdot 3) v}{3} = 56{,}55\ v$$

Następnie z wykresów krzywych płynięcia $\eta = \eta(\dot{\gamma})$ dostępnych w literaturze odczytuje się dla danego gatunku PE-LD, danej wartości $\dot{\gamma}$ oraz dla $t = 235°C$, odpowiednią wartość lepkości dynamicznej η; przykładowo

$$v = 0{,}5\ s^{-1}; \quad \dot{\gamma} = 56{,}55 \cdot 0{,}5 = 28{,}27\ s^{-1}; \quad \eta = 2000\ Pa \cdot s$$

$$v = 1{,}0\ s^{-1}; \quad \dot{\gamma} = 56{,}55 \cdot 1{,}0 = 56{,}55\ s^{-1}; \quad \eta = 1400\ Pa \cdot s$$

Można teraz obliczyć współczynniki zależności (1.77), a więc zgodnie ze wzorami (1.64), (1.65) oraz (1.76)

$$\alpha = \frac{\pi^2 \cdot 0{,}057^2 \cdot 0{,}003 \cdot \sin 18°32' \cdot \cos 18°32'}{2} = 1{,}4496 \cdot 10^{-5}\ m^3$$

$$\beta = \frac{\pi \cdot 0{,}057 \cdot 0{,}003^3 \cdot \sin^2 18°32'}{12 \cdot 4{,}5 \cdot 0{,}06} = 1{,}5080 \cdot 10^{-10}\ m^3$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot 0{,}057^2 \cdot 0{,}00012^3 \cdot \operatorname{tg} 18°32'}{10 \cdot 4{,}5 \cdot 0{,}06 \cdot 0{,}0045} = 1{,}5286 \cdot 10^{-12}\ m^3$$

Dla $v = 0{,}5\ s^{-1}$ poszczególne przepływy wynoszą

$$\dot{W}_w = \alpha v = 1{,}4496 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}5 = 0{,}7248 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{W}_c = \beta \frac{\Delta p}{\eta} = 1{,}5080 \cdot 10^{-10} \frac{0{,}9624 \cdot 12{,}9 \cdot 10^6}{2000} = 9{,}3608 \cdot 10^{-7} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{W}_s = \gamma \frac{\Delta p}{\eta} = 1{,}5286 \cdot 10^{-12} \frac{0{,}9624 \cdot 12{,}9 \cdot 10^6}{2000} = 9{,}4887 \cdot 10^{-9} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{W} = 0{,}7248 \cdot 10^{-5} - 9{,}3608 \cdot 10^{-7} - 9{,}4887 \cdot 10^{-9} = 6{,}3024\ \mu m^3/s$$

Dla $v = 1{,}0\ s^{-1}$ poszczególne przepływy wynoszą

$$\dot{W}_w = \alpha v = 1{,}4496 \cdot 10^{-5} \cdot 1{,}0 = 1{,}4496 \cdot 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{W}_c = \beta \frac{\Delta p}{\eta} = 1{,}5080 \cdot 10^{-10} \frac{0{,}9624 \cdot 19{,}4 \cdot 10^6}{1400} = 2{,}011 \cdot 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{W}_s = \gamma \frac{\Delta p}{\eta} = 1{,}5286 \cdot 10^{-12} \frac{0{,}9624 \cdot 19{,}4 \cdot 10^6}{1400} = 2{,}0385 \cdot 10^{-8} \frac{m^3}{s}$$

$$\dot{W} = 1{,}4496 \cdot 10^{-5} - 2{,}011 \cdot 10^{-6} - 2{,}0385 \cdot 10^{-8} = 12{,}4646\ \mu m^3/s$$

Jeżeli przyjmie się uproszczenie, że $D_{s2} = D$ oraz $\alpha_{s2} = \alpha = \text{arc tg}\,[t/(\pi D)]$, to otrzyma się [1.73] nieco większe wartości przepływów $\dot{W}_w$, $\dot{W}_s$ i $\dot{W}$, a mniejsze $\dot{W}_c$ (tabl. 1.6).

Tablica 1.6

Wyniki obliczeń objętościowych natężeń wypływu

Stopień uproszczenia / Objętościowe natężenia wypływu		$\dot{W}_w$ $10^{-5}\ \frac{m^3}{s}$	$\dot{W}_c$ $10^{-6}\ \frac{m^3}{s}$	$\dot{W}_s$ $10^{-8}\ \frac{m^3}{s}$	$\dot{W}$ $\mu m^3/s$
Mniejszy	$v = 0{,}5\ s^{-1}$	0,7248	0,9361	0,9489	6,3024
	$v = 1{,}0\ s^{-1}$	1,4496	2,011	2,0385	12,4646
Większy	$v = 0{,}5\ s^{-1}$	0,7698	0,8969	0,9987	6,7912
	$v = 1{,}0\ s^{-1}$	1,5397	1,927	2,145	13,4485

Należy podkreślić, że obliczone wartości objętościowego natężenia wypływu dotyczą danej temperatury $t = 235°C$ i ciśnienia $p_2 = 12{,}9$ MPa lub $p_2 = 19{,}4$ MPa, czyli warunków panujących na końcu układu jednoślimakowego. Ale duże znaczenie ma również objętościowe i masowe natężenie wypływu odniesione do warunków normalnych, czyli do temperatury $t_0 = 20°C$ i ciśnienia atmosferycznego $p_0 = 10^5$ Pa. Aby je określić, trzeba przeprowadzić odpowiednie obliczenia, korzystając z cieplnego równania stanu.

Na rysunku 1.80 przedstawiono wykres $p-v-t$ dla PE-LD o nazwie handlowej Lupolen 1810 H. W przypadku $p_2 = 12{,}9$ MPa i $t = 235°C$ odczytuje się trzeci parametr cieplnego równania stanu, a mianowicie objętość właściwą $v_2 = 1{,}321 \cdot 10^{-3}$ m^3/kg, a w przypadku $p_2 = 19{,}4$ MPa i $t = 235°C$ odczytuje się $v_2 = 1{,}312 \cdot 10^{-3}$ m^3/kg.

Masowe natężenie wypływu w temperaturze 235°C równe masowemu natężeniu wypływu w temperaturze 20°C (nie zależy ono od temperatury tworzywa) wynosi

$$\dot{G} = \dot{W}\frac{1}{v_2\,(p,\ t)}$$

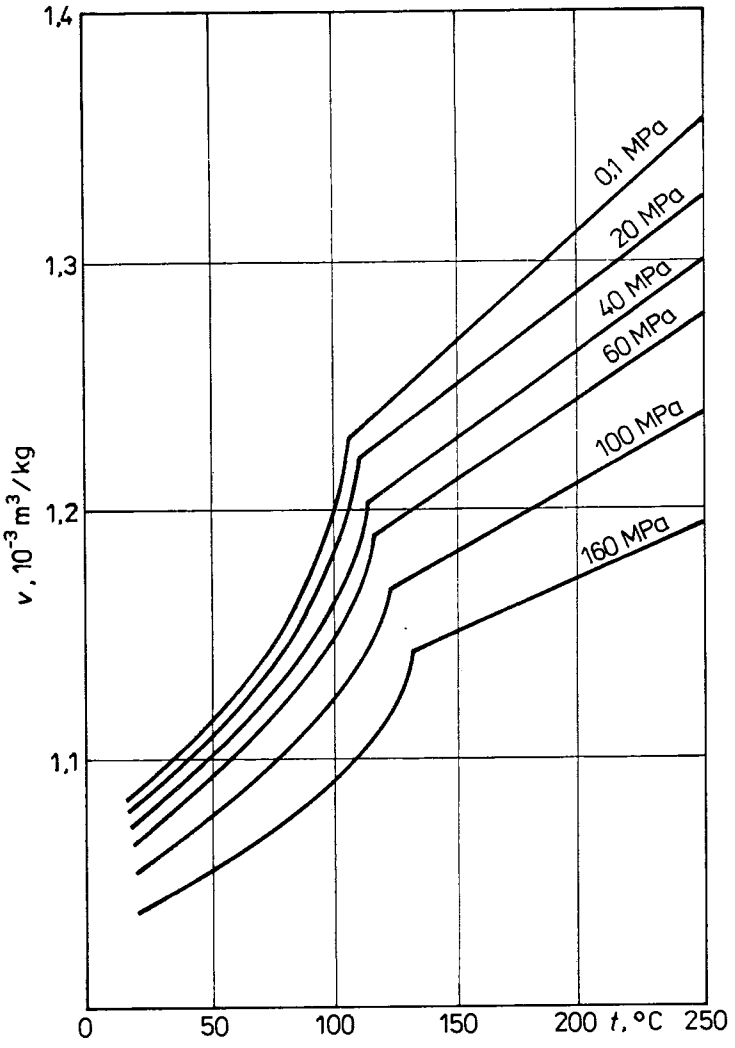
a po podstawieniu danych liczbowych

— dla $v = 0{,}5\ s^{-1}$

$$\dot{G} = 6{,}3024 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{1{,}321 \cdot 10^{-3}} = 4{,}7709 \cdot 10^{-3}\,\frac{kg}{s} = 17{,}1493\,\frac{kg}{h}$$

— dla $v = 1{,}0\ s^{-1}$

$$\dot{G} = 12{,}4646 \cdot 10^{-6}\,\frac{1}{1{,}312 \cdot 10^{-3}} = 9{,}5005 \cdot 10^{-3}\,\frac{kg}{s} = 34{,}9747\,\frac{kg}{h}$$



Rys. 1.80. Zależność $p-v-t$ dla polietylenu o małej gęstości i nazwie handlowej Lupolen 1810 H [1.32]

W celu obliczenia objętościowego natężenia wypływu odniesionego do warunków normalnych należy najpierw wyznaczyć objętość właściwą PE-LD w tych warunkach; z wykresu na rys. 1.80 odczytuje się w obu przypadkach $v_0 = 1{,}081 \cdot 10^{-3}$ m^3/kg. Zatem

$$\dot{W}_0 = \dot{G} v_0 = 4{,}7709 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}081 \cdot 10^{-3} = 5{,}1573 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

oraz

$$\dot{W}_0 = \dot{G} v_0 = 9{,}5005 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}081 \cdot 10^{-3} = 10{,}27 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Przykład 1.3. Obliczyć prędkości poszczególnych przepływów PE-LD w układzie uplastyczniającym jednoślimakowym, jak w przykładzie 1.2.

Rozwiązanie: Prędkość poszczególnych przepływów wyznacza się ze wzoru (1.53). Wielkość $\mathrm{d}p/\mathrm{d}z$ w tym wzorze określa się uwzględniając zależności (1.58) i (1.61) następująco:

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z} = \frac{\Delta p}{L} \sin \alpha_s$$

natomiast V_z oblicza się ze wzoru (1.56).

Zatem wzór (1.53) przybiera postać

$$v = \left(\frac{\pi D_s v \cos \alpha_s}{h}\right) y + \frac{(y^2 - h\,y)\,(\Delta p \sin \alpha_s)}{2\,\eta\,L}$$

Podstawiając teraz dowolne wartości liczbowe y z przedziału $0 \leqslant y \leqslant h$, oblicza się wartości obu wyrażeń składowych podanego wzoru oraz ich sumę algebraiczną. Wyniki przykładowych obliczeń dla prędkości obrotowej $v = 1{,}0\ \mathrm{s}^{-1}$ zestawiono w tabl. 1.7. Zatem przy powierzchni ślimaka ($y = h = 3$ mm) uzyskano największą

Wyniki obliczeń prędkości przepływów **Tablica 1.7**

y, mm	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,25
v_w, $10^{-3}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	169,8	141,5	113,2	84,9	56,6	28,3	14,1
v_c, $10^{-3}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	0,0	−9,8	−15,7	−17,7	−15,7	−9,8	−5,4
v, $10^{-3}\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	169,8	131,7	97,5	67,2	40,9	18,5	8,7

Uwaga: v_w oznacza prędkość przepływu wleczonego, v_c — prędkość przepływu ciśnieniowego, v zaś — prędkość przepływu wzdłużnego (wypadkowego).

prędkość przepływu wzdłużnego (wypadkowego), następnie w miarę oddalania się od tej powierzchni, prędkość ta zmniejsza się, a przy powierzchni cylindra ($y = 0$) wynosi zero. W całym obszarze wartości y wektor prędkości przepływu wzdłużnego jest zgodny z wektorem prędkości przepływu wleczonego.

Przykład 1.4. W układzie dwuślimakowym walcowym o ślimakach jednozwojowych zazębiających się nieszczelnie, wykonujących ruch obrotowy w kierunkach przeciwnych z prędkością obrotową $v = 0{,}5\ \mathrm{s}^{-1}$, jest uplastyczniany PE-LD w temperaturze w strefie dozowania $t = 235°\mathrm{C}$. Elementy geometryczne układu w strefie dozowania są następujące: średnica zewnętrzna ślimaka $D = 2\ R = 60$ mm, skok linii śrubowej $t = 45$ mm, szerokość grzbietu zwoju $e = 22{,}4$ mm, liczba skoków linii śrubowej $z = 6$, głębokość kanału na końcu strefy $h = 9$ mm, kąt pochylenia płaszczyzny bocznej zwoju $\psi = 10°$, luz osiowy $c_0 = 0{,}1$ mm, luz promieniowy $b = 0{,}1$ mm, szczelina pomiędzy grzbietami zwojów a powierzchnią wewnętrzną cylindra $s = 0{,}1$ mm. Obliczyć objętościowe natężenie wypływu tworzywa z układu dwuślimakowego.

Rozwiązanie: Objętościowe natężenie wypływu tworzywa z układu można obliczyć z zależności (1.94), wyznaczając uprzednio wartości wyrażeń składowych.

Kąt środkowy na podstawie wzoru (1.98) po podstawieniu danych liczbowych wynosi

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2} = \frac{\sqrt{0{,}03 \cdot 0{,}009 - \frac{0{,}009^2}{4}}}{0{,}03 - \frac{0{,}009}{2}} = 0{,}6198$$

stąd

$$\alpha = 1{,}1094 \text{ rad}$$

Objętość V_1 wyznacza się z zależności (1.97)

$$V_1 = \left[\left(\pi - \frac{1{,}1094}{2}\right) 0{,}03^2 + \left(0{,}03 - \frac{0{,}009}{2}\right)\sqrt{\left(0{,}03 \cdot 0{,}009 - \frac{0{,}009^2}{4}\right)}\right] 0{,}045 =$$
$$= 1{,}229 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Objętości V_2 oraz V_3 wyznacza się odpowiednio z zależności (1.99) i (1.102)

$$V_2 = \pi(0{,}03 - 0{,}009)^2 \cdot 0{,}045 = 6{,}2343 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$V_3 = 2\pi\left[\left(0{,}03 \cdot 0{,}009 - \frac{0{,}009^2}{2}\right) 0{,}0224 + \left(0{,}03 \cdot 0{,}009^2 - \frac{2}{3}0{,}009^3\right) 0{,}1763\right] =$$
$$= 3{,}4453 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Zatem objętość V, zgodnie ze wzorem (1.96), wynosi

$$V = 1{,}229 \cdot 10^{-4} - 6{,}2343 \cdot 10^{-5} - 3{,}4453 \cdot 10^{-5} = 0{,}261 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

Obliczone wartości pozwalają na wyznaczenie przepływu teoretycznego; zatem na podstawie wzoru (1.95)

$$\dot{W}_t = 2 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}261 \cdot 10^{-4} = 0{,}261 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Należy teraz obliczyć wielkości potrzebne do wyznaczenia poszczególnych rodzajów przepływów:

— prędkość liniowa (osiowa) tworzywa przy powierzchni cylindra (1.109)

$$w = 0{,}5 \cdot 0{,}045 = 0{,}0225 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

— prędkość ścinania, podobnie jak w przykładzie 1.2

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi(D - 2h)v}{h} = \frac{\pi(0{,}06 - 2 \cdot 0{,}009)0{,}5}{0{,}009} = 7{,}33 \text{ s}^{-1}$$

Z wykresów krzywych płynięcia $\eta = \eta(\dot{\gamma})$ odczytuje się dla danej wartości $\dot{\gamma}$ oraz $t = 235°\text{C}$ odpowiednią wartość lepkości dynamicznej, tak jak w przykładzie 1.2, a więc dla

$$\dot{\gamma} = 7{,}33 \text{ s}^{-1}; \qquad \eta = 3100 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

— spadek ciśnienia na jednym zwoju ślimaka (1.121)

$$\Delta p = 6 \cdot 3100 \frac{0{,}0225}{0{,}009^2}(0{,}045 - 0{,}0224) = 116\,767 \text{ Pa}$$

— spadek ciśnienia między końcem i początkiem strefy dozowania

$$\Delta P = z\,\Delta p = 6 \cdot 116\,767 = 700\,602 \text{ Pa}$$

Wartość luzu osiowego c ślimaków oblicza się z zależności (1.114), zatem

$$c = 0{,}0001 + 0{,}0001 \cdot 0{,}1763 = 1{,}1763 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Przepływ międzyślimakowy oblicza się ze wzoru (1.113)

$$\dot{W}_b = 0{,}0054 \left(\frac{0{,}009}{0{,}03}\right)^{1{,}8} \left[0{,}1745 + 2\left(\frac{1{,}1763 \cdot 10^{-4}}{0{,}009}\right)^2\right] \frac{116\,767 \cdot 0{,}03^3}{3100} =$$

$$= 0{,}1099 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Przepływ przeciekowy, na podstawie zależności (1.108), wynosi

$$\dot{W}_s = (2\pi - \alpha)\, 0{,}03 \left\{\frac{0{,}0225 \cdot 0{,}0001}{2} + \frac{0{,}0001^3}{6 \cdot 3100 \cdot 0{,}0224} \left[3 \cdot 3100 \frac{0{,}0225}{0{,}009^2} \cdot \right.\right.$$

$$\left.\left. \cdot (0{,}045 - 0{,}224) + 7000602\right]\right\} = 0{,}1746 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Przepływ międzyzwojowy składa się z dwu członów. Pierwszy człon wyznacza się z zależności (1.119)

$$\dot{W}_{z1} = \pi 0{,}5 (0{,}06 - 0{,}009)(0{,}009 - 0{,}0001)\, 1{,}1763 \cdot 10^{-4} = 0{,}0838 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Aby wyznaczyć człon drugi, należy najpierw określić największą długość l obszaru wzajemnego zachodzenia ślimaków na siebie. Z rysunku 1.55 wynika, że

$$\frac{l}{2} = R \sin \frac{\alpha}{2}$$

a po podstawieniu danych liczbowych i wykonaniu działań

$$l = 0{,}0316 \text{ m}$$

Drugi człon wyznacza się z zależności (1.120)

$$\dot{W}_{z2} = \frac{116\,767 (0{,}009 - 0{,}0001)\, (1{,}1763 \cdot 10^{-4})^3\, 0{,}9848^2}{12 \cdot 3100 \cdot 0{,}0316} \cdot$$

$$\cdot \left[1 - 0{,}63 \frac{1{,}1763 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}9848^2}{0{,}009 - 0{,}0001} + 0{,}052 \left(\frac{1{,}1763 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}9848^2}{0{,}009 - 0{,}0001}\right)^5\right] =$$

$$= 1{,}3831 \cdot 10^{-12} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Zatem

$$\dot{W}_z = \dot{W}_{z1} + \dot{W}_{z2}$$

czyli

$$\dot{W}_z = 0{,}0838 \cdot 10^{-6} + 1{,}3831 \cdot 10^{-12} = 0{,}0838 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Przepływ międzywalcowy wyznacza się z zależności (1.112)

$$\dot{W}_a = \frac{4\,(0{,}045 - 0{,}0224)}{3}\left[\pi 0{,}5\,(0{,}06 - 0{,}009)\,0{,}0001 - \right.$$

$$\left. - \frac{116\,767 \cdot 0{,}0001^3}{6\pi 3100\sqrt{(0{,}06 - 0{,}009)\,\frac{0{,}0001}{2}}}\right] = 0{,}2413 \cdot 10^{-6}\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}}$$

Znając wszystkie wartości wyrażeń składowych zależności (1.94) można obliczyć objętościowe natężenie wypływu z układu dwuślimakowego

$$\dot{W} = 0{,}261 \cdot 10^{-4} - 0{,}1099 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 0{,}1746 \cdot 10^{-6} - 2\,(0{,}0838 + 0{,}2413)\,10^{-6} =$$

$$= 0{,}2499 \cdot 10^{-4}\,\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{s}} = 24{,}99\ \mu\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

Rezultaty uzyskane w przykładach obliczeniowych 1.2 oraz 1.4 są w pewnym stopniu porównywalne. Można więc wyciągnąć z nich wniosek, że w porównywalnych warunkach dla PE-LD, objętościowe natężenie wypływu tworzywa z układu dwuślimakowego jest 24,99/6,3024 = 3,97 razy większe niż z układu jednoślimakowego. Nie można jednak na tej podstawie wysuwać wniosku ogólniejszego, gdyż prędkość obrotowa $\nu = 0{,}5\ \mathrm{s}^{-1}$ w układzie dwuślimakowym odpowiada prędkości stosowanej w rzeczywistych warunkach produkcyjnych, natomiast układy jednoślimakowe pracują na ogół z prędkościami większymi, co powoduje zmniejszenie wartości podanego ilorazu.

Literatura

1.1. Alternative systems for the efficient plastication of polymeric materials. *European Plastics News* 2/1976.
1.2. Anders D.: Processing of PVC on Planetary Screw Extruders. *Industrial and Production Engineering* 3/1979.
1.3. Anders S.: Untersuchung von Misch- und Scherelementen beim Einschneckenextruder. *Plaste und Kautschuk* 2/1980.
1.4. Anders S., Brunner D., Panhans F.: Untersuchungen zur thermischen Inhomogenität der plastizierten Schmelze beim Extrudieren. *Plaste und Kautschuk* 8/1976.
1.5. Басов Н.И., Казанков Ю.В., Любартовиц В.А.: „Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов". Изд. Химия, Москва 1986.
1.6. Bębenek B., Stępień R.: Analiza przepływu stopionych tworzyw sztucznych w kanale wytłaczarki jednoślimakowej. Prace Naukowe Instytutu Inżynierii Chemicznej i Urządzeń Cieplnych Politechniki Wrocławskiej nr 25, Wrocław 1974.
1.7. Blown-film barrier screw for both LLDPE and LDPE. *Plastics Engineering* 12/1983.
1.8. Chung C.I.: Plasticating single-screw extrusion theory. *Polymer Engineering and Science* 2/1971.
1.9. Darnell W.H., Mol E.A.J.: Solids conveying in extruders. *SPE Journal* 4/1956.
1.10. „Der Extruder als Plastifizier-einheit" (praca zbiorowa). VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1977.
1.11. Der Extruder — Grundlage für Qualität und Wirtschaftlichkeit. *Plastverarbeiter* 7/1989.
1.12. Dey S.K. i inni: Mischungskriterium für Zweischneckenextruder. *Kunststoffe* 5/1986.
1.13. Dębski W., Stranc W.: Bezślimakowe systemy plastyfikacji tworzyw sztucznych. *Polimery* 11/1977.
1.14. Diakun J.: Analiza możliwości badania ruchu wybranych materiałów w ślimakowych układach tłoczących w oparciu o pewne klasy modeli dyskretnych. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1980.

1.15. Diakun J.: „Analiza procesów strefy zasilania układów uplastyczniających wytłaczarek ślimakowych". Wyd. WSI w Koszalinie, Koszalin 1987 oraz „Podstawy uaktywniania strefy zasilania w konstrukcji wytłaczarki ślimakowej". Wyd. WSI w Koszalinie, Koszalin 1991.
1.16. Diakun J.: Optymalny skok ślimaka w strefie zasilania wytłaczarki. *Polimery* 5/1987.
1.17. Diakun J.: Ściśliwość granulatu a konstrukcja ślimaka strefy zasilania wytłaczarek jednoślimakowych. „Nowe materiały polimerowe w budowie maszyn". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP w Gliwicach, 1986.
1.18. Diakun J., Sikora R.: Analiza pulsacji ciśnienia w układzie uplastyczniającym wytłaczarki jednoślimakowej. *Polimery* 1/1988.
1.19. Doring E.: Untersuchungen an einer Teledynamik-Spritgiessmaschine. *Kunststoffe* 1/1973.
1.20. Extrusion von Kunststoffen im Unterdruckbereich. *Kunststoffe* 7/1984.
1.21. Fisher E. G.: „Extrusion of Plastics". Wiley and Sons Ltd., London 1958.
1.22. Fuchs G.: Über die Verarbeitung von sehr hochmolekularen PE auf Einschneckenextrudern. *Plastverarbeiter* 10/1968 i 4/1969.
1.23. Hiemenz C. i inni: Verbesserungen am Einschnekenextruder. 8 Kunststofftechnischen Kolloquium des IKV in Aachen 1976.
1.24. Hinrichs D.R., Lillileht L.U.: A modified melting model for plastifying-extruders. *Polymer Engineering and Science* 5/1970.
1.25. Informacja techniczno-handlowa firmy Battenfeld (Niemcy).
1.26. Jacobi H.R.: „Grundlagen der Extrudertechnik". Carl Hanser Verlag, München 1960.
1.27. Janssen L.P.B.M.: A Phenomenological Study on Twin Screw Extruders. Dissertation, Technical University, Delft 1976.
1.28. Janssen L.P.B.M.: „Twin Screw Extrusion". Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam – Oxford – New York 1978.
1.29. Jinescu V.V.: Projekt ślimaka wytłaczarki. *Polimery* 6/1975.
1.30. Jones D.C., Stripling H.F., Flud S.K.: Extrusion without screws: the rotary alternative. *Plastics Engineering* 6/1987.
1.31. Käufer H., Löffler H.: Kaskadenumlaufextruder zur Kunststoffplastifizierung. *Plastverarbeiter* 7/1979.
1.32. „Kenndaten für die Verarbeitung thermoplastischer Kunststoffe. Thermodynamik". Carl Hanser Verlag, München – Wien 1979.
1.33. Kirby R.B.: Process Dynamics of Screw Extruders. *SPE Journal* 10/1962.
1.34. Klein I., Klein R.: The solids-draining screw: a new twist for extrusion. *Plastics Engineering* 10/1979.
1.35. Knappe W.: Was kann die Theorie für die Probleme der Doppelschneckenextruder leisten. 5 Leobender Kunststoffkolloquium Doppelschneckenextruder, Leoben 1978.
1.36. Kosel U.M.: Zur Optimierung eines neuen Schneckenkonzeptes. *CZ-Chemie-Technik* 7/1973.
1.37. Kozłowski M., Pigłowski J., Steller R.: Kryteria oceny ślimaków wtryskowych. *Polimery* 7/1984.
1.38. Kozłowski M., Pigłowski J., Steller R.: Materiały do wyrobu ślimaków wtryskowych. *Polimery* 7/1985.
1.39. Kozłowski M., Pigłowski J., Steller R.: Ślimaki wtryskowe produkcji „Ponar – Żywiec". *Polimery* 4/1985.
1.40. Красовский В.Н., Воскресенский А.М.: „Сборник примеров и задач по технологии переработки полимеров". Изд. Высшейшая Школа, Минск 1975.
1.41. Kupiec S., Bojarska U.: Wytłaczanie politetrafluoroetylenu. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988.
1.42. Kühnle H.: Die Strömung von Kunststoffschmelzen in Schneckenkanälen. *Kunststoffe* 5/1982.
1.43. Ladwig H.: Entgasungs — Plastifiziereinheiten. *Plastverarbeiter* 7/1979.
1.44. Łączyński B.: „Metody przetwórstwa tworzyw sztucznych". WNT, Warszawa 1973.
1.45. Łobocki E.: An analogue model for the transient behaviour of the melting process in a plasticating extruder. Bth AICA Congress, Delft 1976.
1.46. Łobocki E.: Model matematyczny wytłaczarki jednoślimakowej. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Inżynierskiej nr 33, elektryka 5, Zielona Góra 1975.

1.47. Maddock B.H.: A Visual analysis of flow and mixing in extruder screws. *SPE Journal* 5/1959.
1.48. Maddock B.H.: An Improved Mixing-Screw Desing. *SPE Journal* 7/1967.
1.49. Menges G., Döring E.: Hochdruckplastifizierung beim Verarbeiten von Kunststoffen. *Kunststoffe* 10/1973.
1.50. Menges G., Schramm K.: Formteilherstellung aus GFUP mit einer neuartigen Plastifizier- und Spritzeinheit. *Plastverarbeiter* 11/1975.
1.51. Meskat W.: Theorie der Stoffbewegung in Schneckenmaschinen. *Kunststoffe* 3/1955.
1.52. Michalski K.: Nowe elementy konstrukcji wytłaczarek. *Mechanik* 2/1975.
1.53. Milanowski J., Diakun J.: Model idealistyczny kinematyki ruchu materiału w ślimakowym układzie tłoczącym. Prace Instytutu Technologii i Eksploatacji Maszyn Politechniki Lubelskiej, seria C, nr 1, Lublin 1979.
1.54. Misterek B.: Tworzywa sztuczne na Międzynarodowych Targach Tworzyw Sztucznych i Gumy „K 89" w Düsseldorfie. *Polimery* 5/1990.
1.55. „Оборудование для переработки пластмасс" (praca zbiorowa pod red. В.К. Завгородного). Изд. Машиностроение, Москва 1976.
1.56. Patent Niemiecki — RFN 1 909 009.
1.57. Patent Niemiecki — RFN 2 117 997.
1.58. Patent Niemiecki — RFN 2 155 855.
1.59. Patent Niemiecki — RFN 2 446 420.
1.60. Patent Polski 100 919.
1.61. Patent Polski 131 811.
1.62. Patent Polski 144 692.
1.63. Patent USA 3 370 284.
1.64. Pinto G., Tadmor Z.: Mixing and residence time distribution in melt screw extruders. *Polymer Engineering and Science* 5/1970.
1.65. Potente H.: Übertragungsregeln für Zweischneckenmaschinen. *Kunststoffe* 5/1980.
1.66. Potente H., Koch M.: Berechnung einer Mischgütekennzahl für Einschneckenextruder. *Kunststoffe* 9/1986.
1.67. Processing of Thermoplastic Materials (praca zbiorowa pod red. E. Bernhardta). Reinhold, New York 1959.
1.68. *Reviev General Caoutchoucs et Plastiques* 9/1977.
1.69. Рябинин Д.Д., Лукач І .Е.: „Червячные машины для переработки пластических масс и резиновых смесей". Изд. Машиностроение, Москва 1965.
1.70. Schenkel G.: Entwurf und Betrieb von Kunststoff-Schneckenpressen auf Grund einer Qualitätstheorie. *Kunststoffe* 1, 2 i 3/1970.
1.71. Schenkel G.: „Kunststoff-Extrudertechnik". Carl Hanser Verlag, München 1963.
1.72. Shapiro J., Halmos A.L., Pearson J.R.A.: Melting in single screw extruders. *Polymer* 10/1976.
1.73. Sikora R.: „Techniki wytwarzania — Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych". PWN, Warszawa 1987.
1.74. Sikora R.: Wytłaczanie — wytłaczarki. Zarys historyczny, stan aktualny, perspektywy. *Polimery* 8/1982.
1.75. Sikora R., Tomaszewski J.: Efektywność procesu wytłaczania polietylenu. *Polimery* 4/1982.
1.76. Sikora R., Tomaszewski J., Szyc K.: Zużycie układów uplastyczniających maszyn do przetwórstwa tworzyw sztucznych. „Zużycie w urządzeniach technicznych". PAN–PK–AGH, Kraków 1978.
1.77. Силин А.В.: „Динамика процессов переработки пластмасс в червячных машинах". Изд. Машиностроение, Москва 1972.
1.78. Smorawiński A.: „Technologia wtrysku". WNT, Warszawa 1989.
1.79. Smorawiński A.: Uplastycznianie mieszanek elastomerowych w procesie wtrysku. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988.
1.80. Smorawiński A.: Wtrysk z odgazowaniem. *Mechanik* 12/1983.
1.81. Стамбурский Е.А. и др.: „Износ оборудования при переработке пластмасс". Изд. Химия, Москва 1985.

1.82. Stasiek J.: Optymalizacja jednoślimakowych układów uplastyczniających. *Polimery* 7–8/1988.
1.83. Stasiek J.: Teoria i technika wytłaczania wieloślimakowego. „Proces wytłaczania tworzyw sztucznych". PAN–PŚl–PL–Metalchem, Gliwice–Lublin–Toruń 1980.
1.84. Stasiek J.: Wpływ elementów konstrukcyjnych ślimaka oraz czynników technologicznych procesu wytłaczania na wydajność i jakość uplastyczniania. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1983.
1.85. Stasiek J.: Współczesne kierunki rozwoju w konstrukcji układów uplastyczniających wytłaczarek jednoślimakowych do polietylenu. *Polimery* 1/1981.
1.86. Stasiek J.: Współczesne metody technologiczne powlekania ślimaków i cylindrów wytłaczarek i wtryskarek. *Polimery* 12/1976.
1.87. Stasiek J.: Współczesne rozwiązania konstrukcyjne elementów intensyfikujących uplastycznianie w wytłaczarkach jednoślimakowych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2/1985.
1.88. Stasiek J.: Wytłaczarki dwuślimakowe oraz porównanie ich z wytłaczarkami jednoślimakowymi. *Polimery* 10–11/1976.
1.89. Stasiek J., Dzwonkowski J., Kołodziej R.: Problemy doskonalenia i oceny przebiegu procesu mieszania w wytłaczarce jednoślimakowej. *Przemysł Chemiczny* 1/1983.
1.90. Street L.F.: Vorgänge im Einschecken-Extrudern. *Gummi Azbest Kunststoffe* 4/1974.
1.91. Steller R.: Beschreibung des Verhaltens von hochpolymeren Flüssigkeiten in periodisch gestörten Druckströmungen. *Plaste und Kautschuk* 9/1988.
1.92. Steller R., Kozłowski M., Pigłowski J.: Reologiczne podstawy projektowania ślimaków. *Polimery* 2/1986.
1.93. Steller R., Żuchowska D.: Niektóre problemy ilościowego opisu transportu tworzywa w maszynach ślimakowych. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988.
1.94. Stevens M.J.: „Extruder Principles and Operation". Elsevier Applied Science Publishers, London 1985.
1.95. Squires P.H., Wolf C.F.W.: Designing extruders for quality performance. *SPE Journal* 4/1971.
1.96. Tadmor Z.: Fundamentals of plastification extrusion I. A theoretical model for melting. *Polymer Engineering and Science* 7/1966.
1.97. Tadmor Z., Gogos C.G.: „Principles of Polymer Processing". Wiley, New York–Brisbane–Chichester–Toronto 1979.
1.98. Tadmor Z., Hold P., Valsamis L.: A radical design that promises an extruder revolution. *Plastics Engineering* 11 i 12/1979.
1.99. Tadmor Z., Klein I.: „Engineering Principles of Plasticating Extrusion". Van Nostrand Reinhold Book Co., New York 1970.
1.100. „Техника переработки пластмасс" (praca zbiorowa pod red. Н. И. Басова и В. Броя). Изд. Химия, Москва 1985.
1.101. Торнер Р.В.: „Теоретические основы переработки полимеров". Изд. Химия, Москва 1977.
1.102. Triple screw machine. *European Plastics News* 2/1977.
1.103. Walker D.M.: An approximate theory for pressures and arching in hoppers. *Chemical Engineering Science* 21/1966.
1.104. Werner H.: Entgasen von Kunststoffen in mehrwelligen Schneckenmaschinen. *Kunststoffe* 1/1981.
1.105. Wilczyński K.: Fluktuacja temperatury tworzywa w procesie wytłaczania jednoślimakowego. *Polimery* 3/1985.
1.106. Wilczyński K.: Model matematyczny procesu wytłaczania jednoślimakowego, cz. I. Ogólne założenia modelu. *Polimery* 12/1985.
1.107. Wilczyński K.: Model matematyczny wytłaczania jednoślimakowego, cz. II. Zasobnik. *Polimery* 9/1987.
1.108. Wilczyński K.: Ocena sprawności układów uplastyczniających. *Polimery* 2 i 7–8/1988.
1.109. Wilczyński K.: Symulacja komputerowa uplastyczniania tworzywa w wytłaczarce jednoślimakowej. *Polimery* 7/1986.
1.110. Wilczyński K.: Teoria wytłaczania jednoślimakowego tworzyw wielkocząsteczkowych. Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, mechanika z. 127, Warszawa 1989.
1.111. Wróbel K., Łuczaj J.: „Wytłaczanie tworzyw sztucznych". PWT, Warszawa 1961.

Rozdział 2

METODY PRZETWÓRSTWA FIZYCZNO-CHEMICZNEGO I RODZAJU

2.1. Spajanie

Celem spajania jest łączenie tworzyw termoplastycznych, następujące wskutek ich uplastycznienia, a nawet stopienia w miejscu łączenia. Mimo że spajanie jest ograniczone tylko do tworzyw termoplastycznych i że znanych jest wiele innych sposobów łączenia, ma ono duże znaczenie. Spajanie jest dość dobrze opisane w literaturze, poświęca mu się również stosunkowo obszerne opracowania książkowe [2.72, 2.73, 2.78, 2.81, 2.83]. Spajanie dzieli się na zgrzewanie i spawanie.

2.1.1. Zgrzewanie

Zgrzewaniem nazywa się łączenie tworzyw poprzez ich uplastycznienie i stopienie w miejscu łączenia, z wywarciem docisku wzajemnego elementów łączonych bez dodania spoiwa. Zgrzewalność różnych tworzyw jest dość odmienna. Proces zgrzewania odbywa się w warstwach wierzchnich tworzyw łączonych (lub w ich masie), doprowadzonych pod wpływem ciepła do stanu plastycznego i ciekłego — w obszarze tym zachodzi wzajemne przeplatanie się makrocząsteczek (lub ich segmentów) tworzyw łączonych, co ułatwia ich wzajemny docisk. Proces zgrzewania jest determinowany przede wszystkim przez: temperaturę, do jakiej nagrzewa się tworzywa łączone, zbliżoną do temperatury topnienia, docisk wywierany na łączone części, czas zgrzewania oraz czas i warunki ochładzania złącza.

W zależności od miejsca doprowadzania lub powstawania ciepła w procesie zgrzewania rozróżnia się następujące odmiany zgrzewania:

— zgrzewanie, w którym ciepło doprowadza się do zewnętrznej strony elementów łączonych, np. zgrzewanie za pomocą nagrzanego drutu, taśmy lub listwy, zgrzewanie impulsowe;

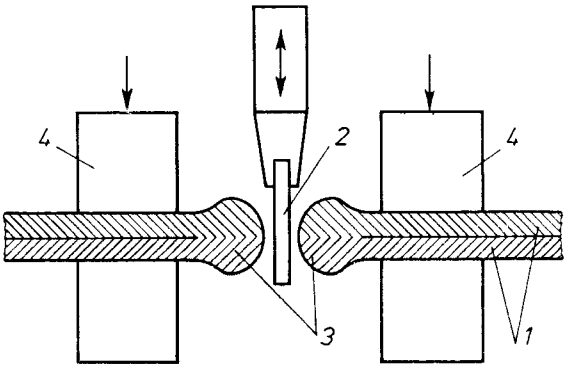
— zgrzewanie, w którym ciepło doprowadza się do wewnętrznej strony elementów łączonych, np. zgrzewanie przy użyciu nagrzanego klina lub płyty;

— zgrzewanie, w którym ciepło jest wytwarzane w warstwach wierzchnich tworzyw łączonych lub w całej masie tworzyw, np. zgrzewanie tarciowe, drganiowe, pojemnościowe, ultradźwiękowe i indukcyjne.

Wymienione tu drut, listwa, klin i płyta spełniają funkcję narzędzi do zgrzewania. Z punktu widzenia fizyki procesu zgrzewania, najwłaściwsze są odmiany z grupy ostatniej, a mało efektywne z grupy pierwszej, o czym decyduje sposób przenoszenia ciepła i związana z tym sprawność energetyczna procesu. Ze względu jednak na stosunkowo proste maszyny do zgrzewania, odmiany grupy pierwszej są rozpowszechnione w przemyśle, ale stosuje się je głównie do zgrzewania elementów cienkich, np. folii.

Zgrzewanie za pomocą nagrzanego drutu lub taśmy

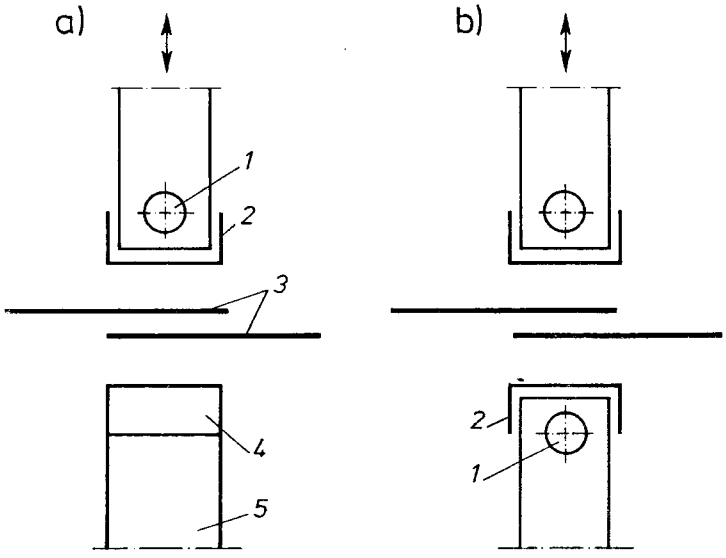
Polega ono na uplastycznieniu i stopieniu tworzywa elementów łączonych w miejscu docisku wywieranego nagrzanym drutem lub taśmą rezystancyjną, przez które płynie prąd elektryczny, następnie odjęciu drutu lub taśmy i ochłodzeniu miejsca zgrzewania. Często zgrzewanie to stosuje się do toreb i worków z folii PE i wówczas drut lub taśma rozdziela poprzecznie spłaszczoną rurę z folii (rękaw), przesuwaną pod nim, i zgrzewa tworzone podczas tego krawędzie (rys. 2.1).



Rys. 2.1. Schemat zgrzewania za pomocą nagrzanej taśmy rezystancyjnej: *1* — folia zgrzewana, *2* — taśma, *3* — zgrzeina, *4* — elementy dociskające, np. rolki

Zgrzewanie za pomocą nagrzanej listwy

Zgrzewanie to, należące do najstarszych i nazywane również *zgrzewaniem kontaktowym,* polega na ściśnięciu i uplastycznieniu tworzywa elementów łączonych pomiędzy nagrzaną listwą i nie nagrzanym podłożem (rys. 2.2a) lub dwiema



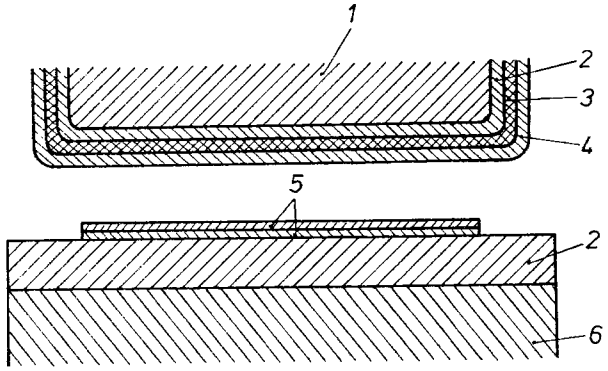
Rys. 2.2. Schemat zgrzewania za pomocą nagrzanej listwy: a) z jedną listwą grzejną, b) z dwiema listwami grzejnymi; *1* — nagrzana listwa z grzejnikiem rezystancyjnym, *2* — przekładka, *3* — folia zgrzewana, *4* — guma silikonowa, *5* — podłoże nie nagrzane

nagrzanymi listwami (rys. 2.2b) oraz ochłodzeniu złącza pozostającego pod naciskiem i wyjęciu zgrzanych folii spod listew. W celu uniknięcia przywierania nagrzanych listew

metalowych do plastycznego tworzywa, jak również zmniejszenia strat ciepła w przypadku nie nagrzanego podłoża, pokrywa się je odpornymi na temperaturę zgrzewania smarami silikonowymi lub lakierami fluorowymi bądź stosuje się przekładki z folii PTFE, tkaniny szklanej przesyconej PTFE lub gumy silikonowej. Listwy nagrzewa się rezystancyjnie.

Zgrzewanie impulsowe

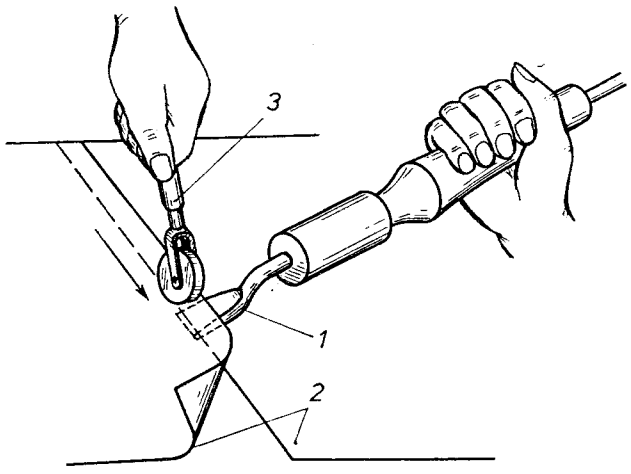
Stanowi ono modyfikację zgrzewania za pomocą nagrzanej listwy i polega na ściśnięciu i uplastycznieniu tworzywa elementów łączonych pomiędzy szybko nagrzewanymi i następnie ochładzanymi listwami łącznie ze zgrzeiną. Możliwość szybkiego nagrzewania i ochładzania uzyskuje się głównie wskutek odpowiedniej konstrukcji listwy ruchomej (rys. 2.3). Listwa ta, mając małą pojemność cieplną, pod wpływem krótkotrwałego przepływu prądu elektrycznego (od 0,1 do kilku s) szybko się nagrzewa, a po wyłączeniu prądu — szybko się ochładza. Wyjmowanie zgrzanych folii spod chłodnych listew odbywa się na ogół bez przywarć folii, choć niekiedy stosuje się przekładki na listwach. Zgrzewanie impulsowe stosuje się do folii PE i PP o grubości do 0,6 mm, folii PS do 0,2 mm, folii PVC do 0,1 mm [2.50]. Nacisk listew wynosi 240 ÷ 640 N [2.84].



Rys. 2.3. Schemat zgrzewania impulsowego: *1* — listwa ruchoma, *2* — izolacja cieplna, *3* — element grzejny, *4* — przekładka, *5* — folia zgrzewana, *6* — podłoże

Zgrzewanie za pomocą nagrzanego klina

Zgrzewanie to polega na uplastycznieniu tworzywa elementów łączonych poprzez kontakt z nagrzanym klinem, przesuwanym wzdłuż miejsca łączenia i docisku do siebie

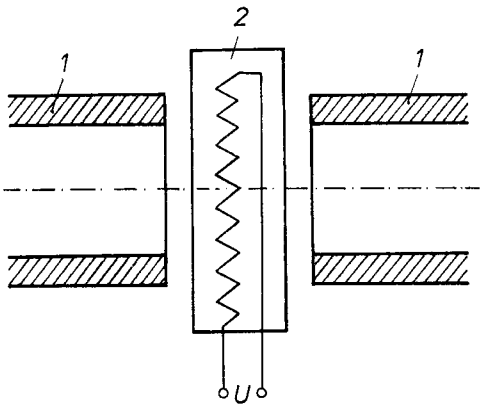


Rys. 2.4. Zgrzewanie folii nagrzanym klinem: *1* — nagrzany klin, *2* — folia zgrzewana, *3* — rolka dociskająca

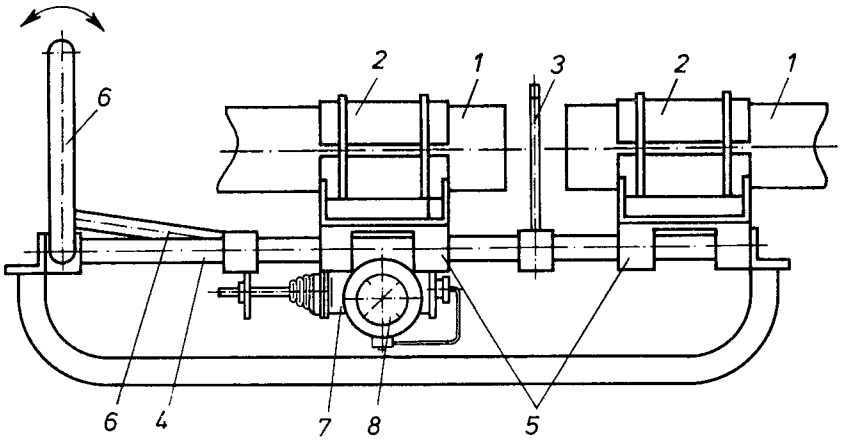
elementów łączonych, np. przy użyciu rolki (rys. 2.4). Źródłem ciepła bywa często kolba lutownicza z końcówką klinową pokrytą PTFE w celu wyeliminowania przywierania tworzywa. Opisane zgrzewanie stosuje się głównie w warunkach rzemieślniczych i wymaga ono dużej wprawy oraz zręczności.

Zgrzewanie za pomocą nagrzanej płyty

Pręty lub rury z PE, PP, PB oraz PVC można zgrzewać poprzez uplastycznianie warstwy wierzchniej elementów łączonych wskutek kontaktu, często bezpośredniego, z płytą nagrzewaną elektrycznie (rezystancyjnie), następnie usunięcie płyty i niezwłoczne dociśnięcie do siebie (0,05 ÷ 0,6 MPa) łączonych elementów oraz ochłodzenie złącza (rys. 2.5). Do zgrzewania elementów o średnicy do 250 mm płyta ma zwykle kształt koła, a do większych — pierścienia [2.51]. Płyta może mieć powierzchnie płaskie bądź — w celu zwiększenia pola powierzchni łączenia podczas kontaktu bezpośredniego — specjalnie profilowane, pokryte PTFE. Ta odmiana zgrzewania jest dość szeroko stosowana; proces może być ręczny lub z użyciem odpowiednich zgrzewarek, np. względnie prostych (rys. 2.6) lub bardziej złożonych o nazwie ZIS (Niemcy) [2.7] lub firmy Wernli + Partner AG (Szwajcaria).



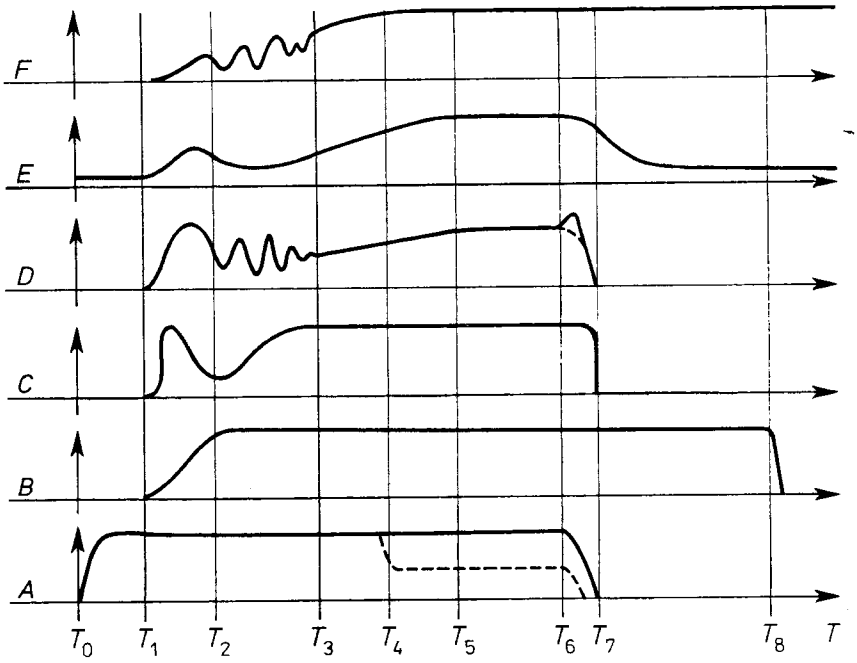
Rys. 2.5. Schemat zgrzewania za pomocą nagrzanej płyty: *1* — płyta nagrzewana (płaska), *2* — zgrzewane elementy (rury)



Rys. 2.6. Schemat prostej zgrzewarki do zgrzewania czołowego rur za pomocą nagrzanej płyty: *1* — zgrzewane rury, *2* — uchwyty rur, *3* — płyta nagrzana, *4* — prowadnice, *5* — stoły do uchwytów rur, *6* — dźwignie dociskowe ręczne, *7* — przekaźnik hydrauliczny, *8* — manometr kontrolny [2.19]

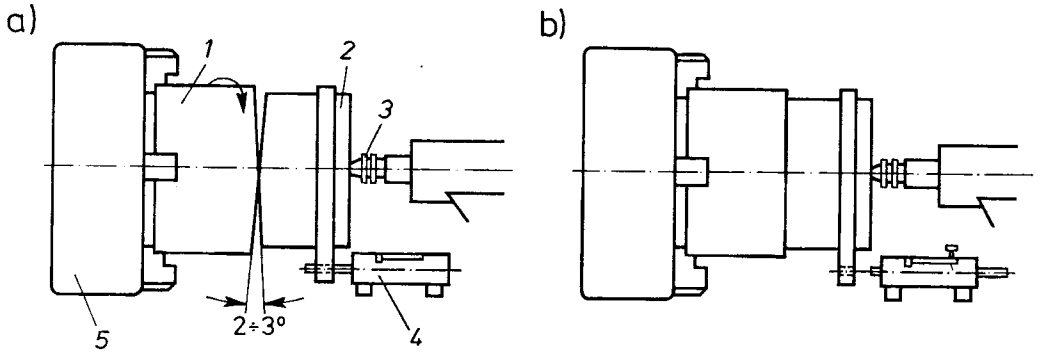
Zgrzewanie tarciowe

Zgrzewanie tarciowe polega na wprawieniu w ruch obrotowy jednego lub obu elementów łączonych i dociśnięciu ich, dzięki czemu, wskutek istnienia tarcia wiertnego, generuje się ciepło w warstwie wierzchniej części łączonych, powodujące ich uplastycznienie. Ostatnim etapem zgrzewania jest ochładzanie złącza pozostającego pod naciskiem i ewentualnie usunięcie wypływów tworzywa w obszarze zgrzeiny. Na rysunku 2.7 przedstawiono ogólnie przebieg prędkości obrotowej (*A*), siły dociskającej elementy zgrzewane (*B*), udziału powierzchni tarcia (*C*), momentu tarcia (*D*), średniej temperatury tarcia (*E*) i wytrzymałości złącza (*F*), w czasie *T* procesu zgrzewania.



Rys. 2.7. Ogólny przebieg niektórych wielkości charakteryzujących proces zgrzewania tarciowego rur w czasie *T*: $A \div F$ — wielkości charakterystyczne opisane w tekście, $T_0 \div T_8$ — czasy odpowiadające istotnym zmianom tych wielkości [2.46]

W przedziale czasu $T_1 \div T_3$ proces nie jest jeszcze ustabilizowany; niektóre wielkości charakteryzują się dużą zmiennością, co ma ścisły związek z występowaniem w tym okresie drgań. Zgrzewanie to można przeprowadzać na tokarkach (rys. 2.8),



Rys. 2.8. Zgrzewanie tarciowe na tokarce: a) przed procesem zgrzewania, b) po procesie zgrzewania; *1* — część zgrzewana wykonująca ruch obrotowy, *2* — część zgrzewana nieruchoma, *3* — kieł obrotowy, *4* — ustalacz, *5* — uchwyt centrujący tokarki

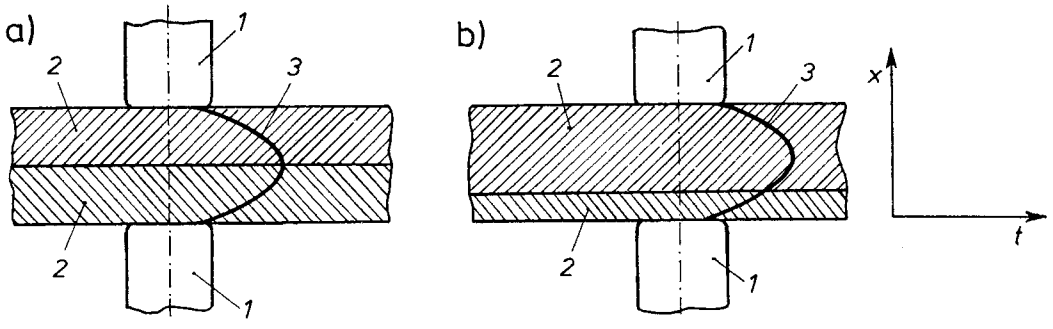
wiertarkach lub specjalnie do tego skonstruowanych zgrzewarkach, np. o nazwie ZT (Instytut Spawalnictwa w Gliwicach). Uplastycznianie warstwy wierzchniej przebiega w ciągu od kilku do kilkudziesięciu sekund przy nacisku jednostkowym 0,5÷1 MPa. W związku z tym całkowity czas zgrzewania jest krótki; poza tym zgrzewanie tarciowe odznacza się dużą sprawnością energetyczną. Wymienione zalety oraz dobra jakość złącz zgrzewanych powodują, że zaleca się je stosować wszędzie tam, gdzie to tylko możliwe ze względu na kształt i wymiary elementów łączonych, zwłaszcza do złącz doczołowych i zakładkowych rur.

Zgrzewanie drganiowe

Jest ono modyfikacją zgrzewania tarciowego, z tym, że ciepło niezbędne do uplastyczniania warstw wierzchnich generuje się wskutek drgań, jednego lub obu elementów łączonych. W przypadku drgań liniowych ich częstotliwość wynosi zazwyczaj 100 Hz, amplituda 3÷5 mm, nacisk jednostkowy około 1,5 MPa. Czas uplastyczniania jest rzędu od 2 do 3 s, a całkowity czas zgrzewania wynosi 6÷15 s [2.4, 2.7, 2.65]. Elementy łączone mogą również wykonywać drgania skrętne, np. o amplitudach skierowanych przeciwnie [2.74].

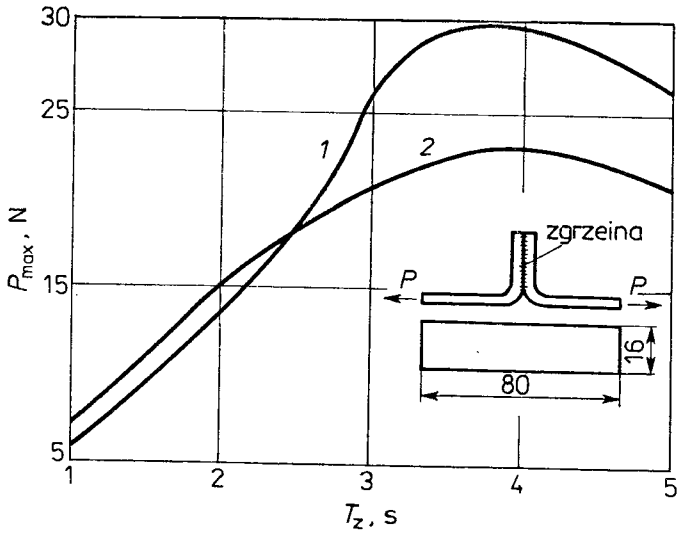
Zgrzewanie pojemnościowe

Zgrzewanie to polega na ściśnięciu i uplastycznieniu tworzywa elementów łączonych pomiędzy listwami, będącymi elektrodami kondensatora, w którym wytwarza się zmienne pole elektryczne, powodujące nagrzewanie się tworzywa w całej masie, i następnie ochłodzeniu złącza oraz wyjęciu elementów spod elektrod. Ponieważ elektrody nie są ogrzewane, następuje przenoszenie ciepła z tworzywa do elektrod, w rezultacie tworzywo nagrzewa się nierównomiernie: mniej — bliżej elektrod, więcej — w pobliżu środka (rys. 2.9). Pokazany na rysunku rozkład temperatury jest oczywiście korzystny z punktu widzenia procesu zgrzewania, ułatwia bowiem uplastycznienie warstw wierzchnich w miejscu łączenia oraz zmniejsza przywieranie tworzyw do elektrod. Podczas zgrzewania tworzyw o grubości mniejszej od 0,1 mm wspomniane przenoszenie ciepła jest już znaczne i w tych przypadkach nie zaleca się stosować zgrzewania pojemnościowego.



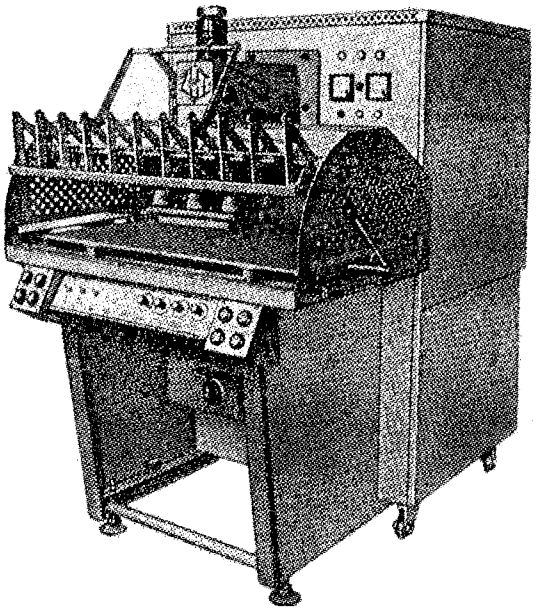
Rys. 2.9. Rozkład temperatury t w procesie zgrzewania pojemnościowego folii o równym współczynniku strat dielektrycznych: a) zgrzewanie folii o jednakowej grubości, b) zgrzewanie folii o różnej grubości; *1* — elektrody, *2* — folie zgrzewane, *3* — krzywe rozkładu temperatury

Aby wytworzyć potrzebny strumień ciepła, przyjmuje się, że częstotliwość ma standardową wartość 27,12 MHz z odchyłkami $\pm 0{,}6\%$, a współczynnik strat dielektrycznych tworzywa przy tej częstotliwości — wartość co najmniej tg $\delta = 0{,}1$. Częstotliwość tę uzyskuje się najczęściej za pomocą generatorów lampowych. Nacisk jednostkowy elektrod wynosi $0{,}35 \div 3{,}5$ MPa. Czas działania zmiennego pola elektrycznego zawiera się w granicach od 0,1 do 6 s i wpływa istotnie na właściwości złącza (rys. 2.10), a czas ochładzania złącza pozostającego pod naciskiem nie przekracza 10 s. Na ogół stosuje się przekładki na elektrody, zwłaszcza podczas zgrzewania folii o grubości tylko nieco przekraczającej 0,1 mm. Zapobiega to nie tylko stratom ciepła do elektrod, ale również zapobiega wyładowaniom elektrycznym między elektrodami



Rys. 2.10. Zależność największej siły P_{max} niszczącej złącze rozgałęźne folii ze zmiękczonego PVC (KKF-2) o grubości folii 0,15 mm od czasu T_z działania zmiennego pola elektryczngo o częstotliwości 27,12 MHz$\pm$0,6%; stosowano przekładki na elektrody z PTFE o grubości 0,7 mm oraz zgrzewarkę pojemnościową ZUT 2B o mocy 2 kW (ZDRZSI w Warszawie)

i polepsza, wskutek odkształcalności, przyleganie elektrod do folii, przez co polepsza jakość złącza. Do zgrzewania stosuje się zgrzewarki o różnej konstrukcji; jedną z nich pokazano na rys. 2.11.



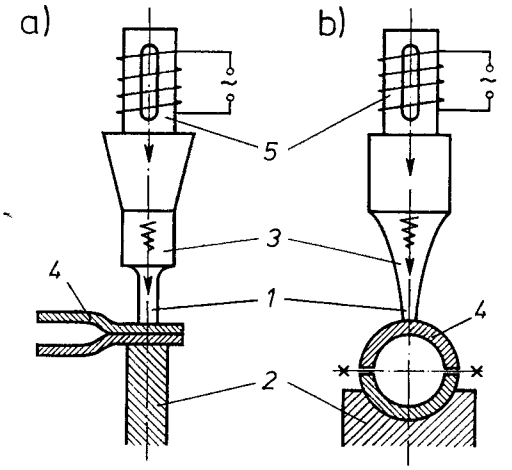
Rys. 2.11. Wygląd ogólny zgrzewarki pojemnościowej ZUT 2AM (ZDRZSI w Warszawie)

Zgrzewanie ultradźwiękowe

Polega ono na ściśnięciu i uplastycznieniu tworzywa elementów łączonych pomiędzy sonotrodą, stanowiącą zakończenie transformatora ultradźwiękowego i wprawianą w drgania o częstotliwości ultradźwiękowej, a statycznym kowadłem. Drgania ultradźwiękowe dochodzące do strefy złącza wywołują ostatecznie tarcie na powierzchni łączenia, a generowane ciepło powoduje uplastycznianie warstw wierzchnich tworzyw łączonych. Na szczególną uwagę zasługuje proces tłumienia (pochłaniania) fali ultradźwiękowej przez tworzywo, czemu również towarzyszy wydzielanie się ciepła. Jeżeli fala ultradźwiękowa ma amplitudę A_0 w miejscu powstawania i rozchodzi się w tworzywie o określonym współczynniku tarcia wewnętrznego β, to amplituda A_x fali jako funkcja energii ultradźwiękowej zmienia się zgodnie z zależnością [2.32, 2.81]

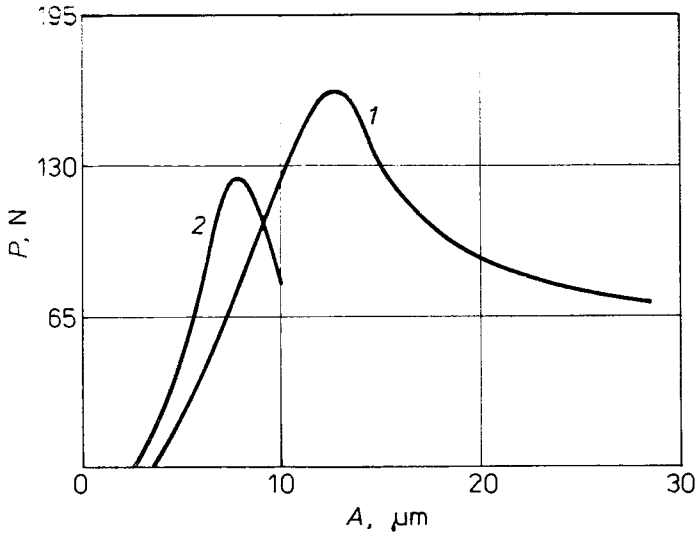
$$A_x = A_0 \exp(-\beta x) \tag{2.1}$$

gdzie x oznacza drogę, jaką przebyła fala. Tak więc wraz z przebytą drogą amplituda (a zatem i energia ultradźwiękowa) maleje. W związku z tym w przypadku tworzyw o dużym współczynniku sprężystości, a więc mniej tłumiących drgania (np. PS i PMMA), odległość, jaką może przebyć fala od punktu wprowadzenia drgań do strefy złącza, jest większa niż w przypadku tworzyw o małym współczynniku sprężystości (np. PE i PVC zmiękczony). Gdy drgania są wprowadzane w pewnej odległości od miejsca zgrzewania, najwięcej 100÷250 mm, proces nosi nazwę *zgrzewania pośredniego*, jeżeli zaś są wprowadzane blisko miejsca zgrzewania, np. oddalonego o 0,5÷1,5 mm, proces nazywa się *zgrzewaniem bezpośrednim* (rys. 2.12).



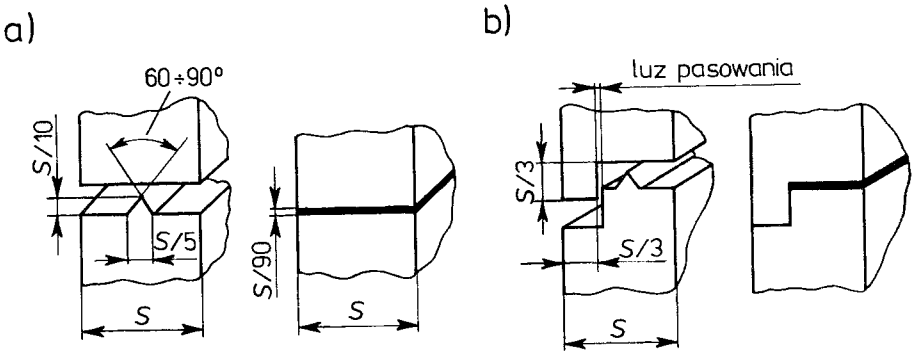
Rys. 2.12. Zasada zgrzewania ultradźwiękowego bezpośredniego (a) oraz zgrzewania ultradźwiękowego pośredniego (b): *1* — sonotroda, *2* — kowadło, *3* — transformator ultradźwiękowy, *4* — elementy zgrzewane, *5* — przetwornik ultradźwiękowy

Amplituda drgań ultradźwiękowych zawiera się w granicach 10÷30 μm, natomiast nacisk jednostkowy wynosi od ułamka do 10 MPa — obie wielkości mają istotny wpływ na właściwości złącz (rys. 2.13). Obowiązuje zasada, że nacisk jest większy, gdy amplituda jest mniejsza, i odwrotnie [2.14]. Częstotliwość drgań na ogół jest nie mniejsza niż 18 i nie większa niż 22 kHz. Czas działania drgań wynosi zazwyczaj 0,1÷2 s, a całkowity czas zgrzewania wydłuża się o czas ochładzania elementów zgrzewanych pod naciskiem, wynoszący 2÷3 s. Szczególne znaczenie ma konstrukcja złączy. Większość złączy konstruuje się tak, aby przenosiły obciążenia rozciągające i w mniejszm stopniu ścinające. Wyczerpujący przegląd konstrukcji złącz można



Rys. 2.13. Zależność siły P niszczącej złącze zakładkowe folii ze zmiękczonego PVC o grubości folii 0,3 mm i szerokości 35 mm od amplitudy A drgań ultradźwiękowych i nacisku jednostkowego 0,4 MPa (*1*) oraz 10 MPa (*2*); czas działania ultradźwięków w procesie zgrzewania bezpośredniego 0,3 s [2.32]

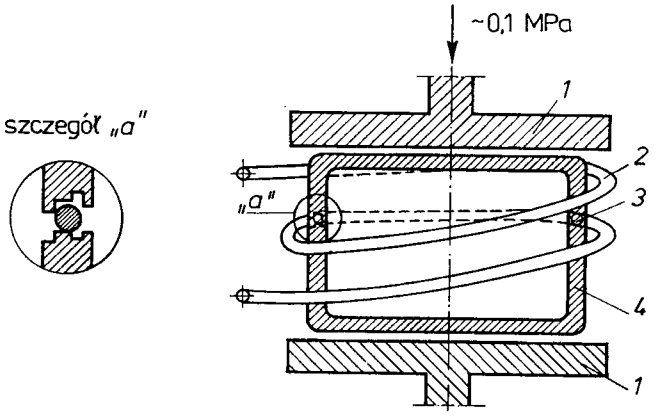
znaleźć w literaturze [2.47, 2.81]. Na rysunku 2.14 przedstawiono przykładowo złącza czołowe i stopniowe przed procesem zgrzewania pośredniego i po nim. Jakość złączy ulega istotnej poprawie, gdy stosuje się zgrzewarki sterowane mikroprocesorem [2.41].



Rys. 2.14. Wybrane złącza do zgrzewania ultradźwiękowego pośredniego przed procesem i po nim: a) złącze czołowe, b) złącze stopniowe

Zgrzewanie indukcyjne

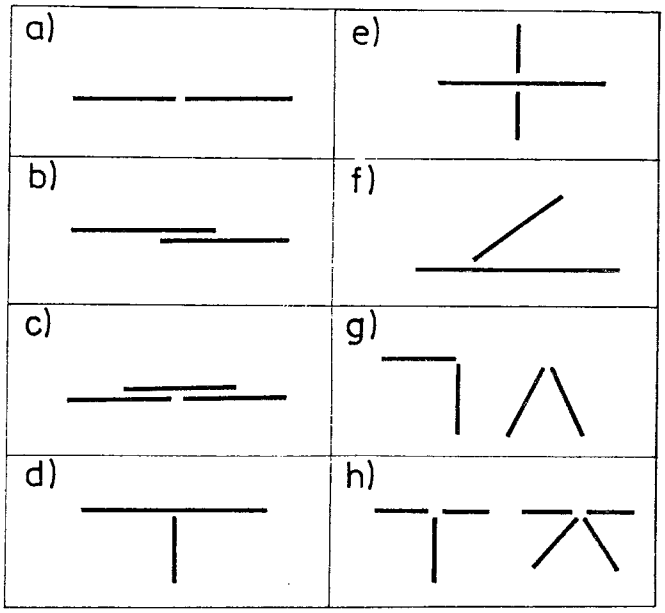
Jest ono możliwe wówczas, gdy w strefie łączenia umieszczony zostanie przewodnik elektryczny, który nagrzewa się w zmiennym polu magnetycznym (rys. 2.15). Wokół przewodnika tworzywo ulega uplastycznieniu wskutek przewodzenia ciepła od niego do tworzywa. Wadą tej odmiany zgrzewania jest m.in. pozostawanie przewodnika w obszarze zgrzeiny.



Rys. 2.15. Zasada zgrzewania indukcyjnego: *1* — płyty dociskowe, *2* — cewka indukcyjna, *3* — pierścień metalowy, *4* — przedmiot zgrzewany [2.33]

2.1.2. Spawanie

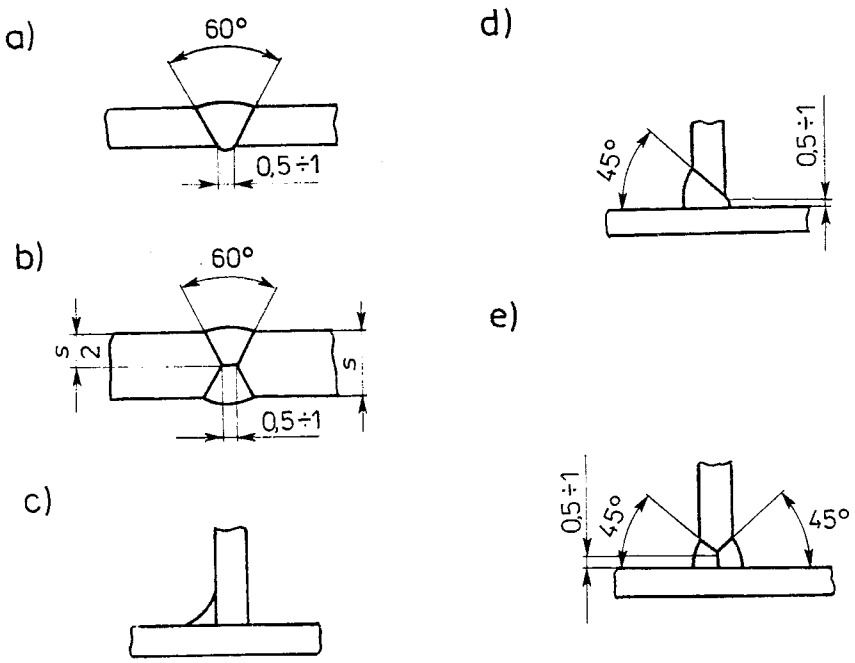
Spawaniem nazywa się łączenie tworzyw poprzez ich uplastycznienie i stopienie w miejscu łączenia, bez wywierania nacisku wzajemnego elementów łączonych, z dodaniem spoiwa. Fizyka procesu spawania w istocie nie różni się od fizyki procesu zgrzewania, jest ono jednak mniej rozpowszechnione.



Rys. 2.16. Rodzaje połączeń spawanych: a) doczołowe, b) zakładkowe, c) nakładkowe, d) teowe, e) krzyżowe, f) ukośne, g) kątowe, h) wielokrotne

Rodzaje połączeń spawanych tworzyw przedstawiono na rys. 2.16. Z pokazanych połączeń nie zaleca się stosować połączeń zakładkowych i nakładkowych podczas łączenia części grubych, powstaje bowiem wówczas niekorzystny rozkład naprężeń przy obciążeniu połączeń. Omawiane połączenia spawane można wykonać za pomocą różnych rodzajów spoin (rys. 2.17), np. połączenie doczołowe może być wykonane za pomocą spoiny V lub spoiny X, połączenie teowe — za pomocą spoiny pachwinowej lub spoiny K. Wybór rodzaju połączenia i spoiny oraz jej wymiarów zależy przede wszystkim od konstrukcji połączenia, rodzaju i wartości przenoszonych obciążeń i powstających naprężeń pospawalniczych. Nadawanie odpowiedniego kształtu powierzchni do spawania przeprowadza się różnymi metodami obróbki skrawaniem: ręcznie — pilnikiem, strugiem lub cykliną, mechanicznie — na strugarce, frezarce, przecinarce itd. Struktura geometryczna powierzchni nie ma istotnego wpływu na efekty spawania.

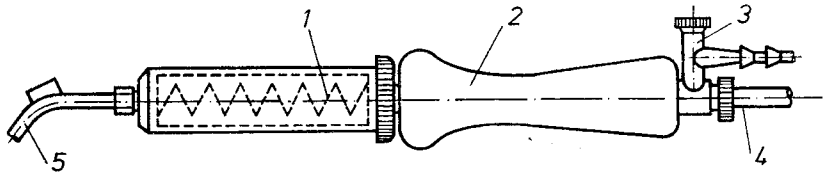
Największe znaczenie ma spawanie tworzyw w strumieniu gorącego gazu. Strumień ten stanowi najczęściej powietrze lub rzadziej azot i dwutlenek węgla. Stosowanie azotu i dwutlenku węgla zabezpiecza tworzywa przed nadmiernym utlenianiem w podwyższonej temperaturze, mogącym występować podczas stosowania powietrza — ma to szczególne znaczenie przy spawaniu tworzyw stosunkowo łatwo ulegających utlenianiu, jak np. PA i PE, wymaga jednak intensywnej wentylacji pomieszczenia roboczego, aby nie gromadziły się w nim nadmierne ilości tych gazów. Podstawowe parametry gazu opuszczającego palnik są następujące: temperatura, która zależy



Rys. 2.17. Rodzaje spoin: a) spoina V, b) spoina X, c) spoina pachwinowa, d) spoina HV, e) spoina K

głównie od temperatury topnienia tworzywa i na ogół zawiera się w granicach 210÷290°C, oraz ciśnienie, które powinno wynosić od 0,006 do 0,05 MPa.

Wymienione parametry uzyskuje gaz w specjalnych palnikach, które ze względu na źródło ciepła dzielą się na palniki elektryczne i gazowe. Spełniają one funkcje narzędzia w procesie spawania. W *palnikach elektrycznych* (rys. 2.18) źródłem ciepła jest grzejnik elektryczny o mocy 250÷500 W zasilany prądem 220 V i 50 Hz, a w *palnikach gazowych* — gaz palny (np. wodór, gaz świetlny, mieszanina propan–butan, rzadziej acetylen) spalany w obecności powietrza. Ze względu na wydajność, wygodę i bezpieczeństwo pracy stosuje się coraz powszechniej palniki elektryczne. W najczęściej spotykanych rozwiązaniach do palnika, np. pokazanego na rys. 2.18, doprowadza się sprężony gaz z dmuchawy, sprężarki lub butli ciśnieniowej. Znane są również rozwiązania, w których dmuchawę umieszcza się bezpośrednio w palniku [2.56].

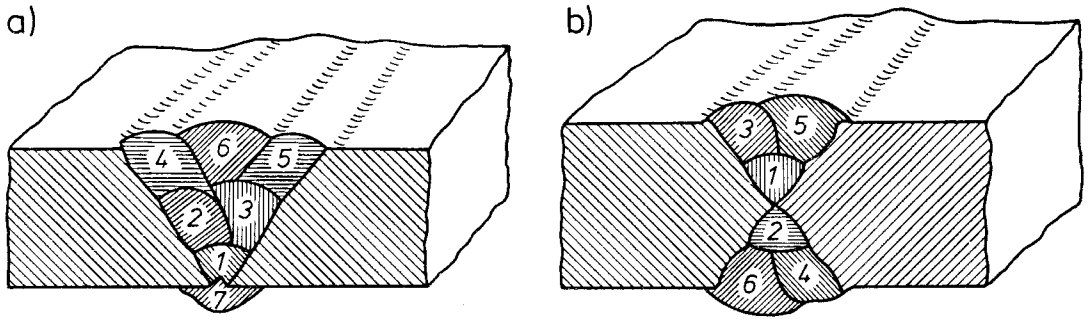


Rys. 2.18. Palnik elektryczny: *1* — grzejnik elektryczny, *2* - rękojeść, *3* — doprowadzenie sprężonego gazu, *4* — doprowadzenie prądu elektrycznego, *5* — końcówka palnika z dyszą

Przed przystąpieniem do spawania unieruchamia się łączone elementy. Po ustaleniu się temperatury gazu opuszczającego palnik, gaz skierowuje się na obszar łączonych części i pręta spawalniczego. Temperaturę gazu można regulować w pewnym stopniu, zmieniając odległość końcówki palnika od miejsca spawania. Trzeba zaznaczyć, że wskutek złego przenoszenia ciepła przez tworzywa i małej pojemności cieplnej gazów,

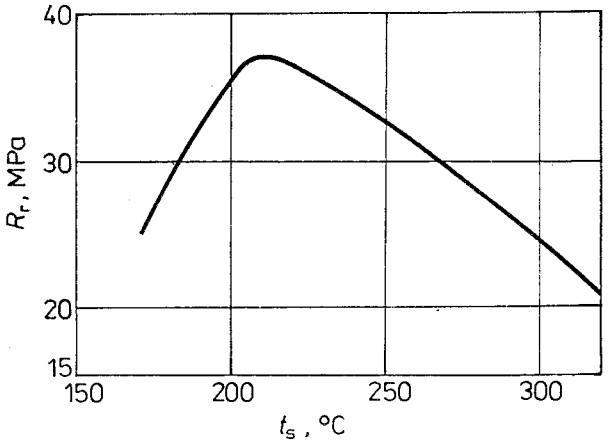
doprowadzenie do tworzyw spawanych i pręta odpowiedniej ilości ciepła jest zadaniem trudnym i wymaga pewnej wprawy i doświadczenia [2.72, 2.73, 2.82].

Pręty spawalnicze wykonywane są metodą wytłaczania z tego samego lub podobnego tworzywa, co materiał elementów łączonych. Mają one najczęściej przekrój kołowy i średnicę 2÷6 mm. Spotyka się również pręty o przekroju trójkątnym lub prostokątnym. Podczas spawania elementów o grubości większej niż 2 mm, często nie można nałożyć od razu w jednej operacji całej spoiny. Spoinę w takich przypadkach tworzy się poprzez łączenie ze sobą prętów, jak to pokazano przykładowo na rys. 2.19.



Rys. 2.19. Tworzenie spoiny z kilku prętów spawalniczych: a) w przypadku spoiny V, b) w przypadku spoiny X; liczby wskazują kolejność nakładania prętów

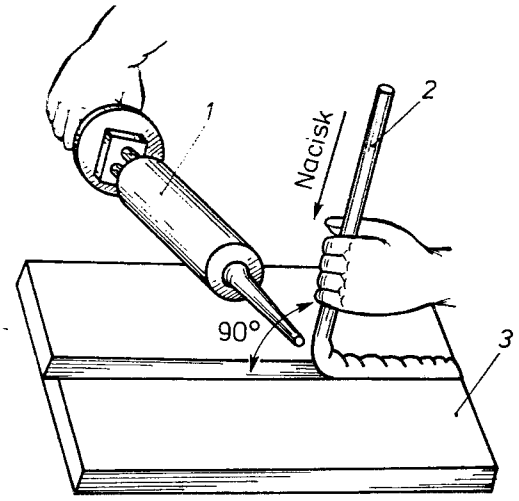
Podczas spawania wywiera się na pręt jednostajny nacisk w kierunku elementów łączonych o wartości od 5÷8 N przy pręcie o średnicy 2 mm do 20÷26 N przy pręcie o średnicy 5 mm [2.4] bądź pręt (pręty) ułożone w rowku spawalniczym dociska się rolką [2.42]. Temperatura gazu oraz właściwa wartość i jednostajność nacisku lub docisku w sposób istotny wpływają na jakość połączeń (rys. 2.20).



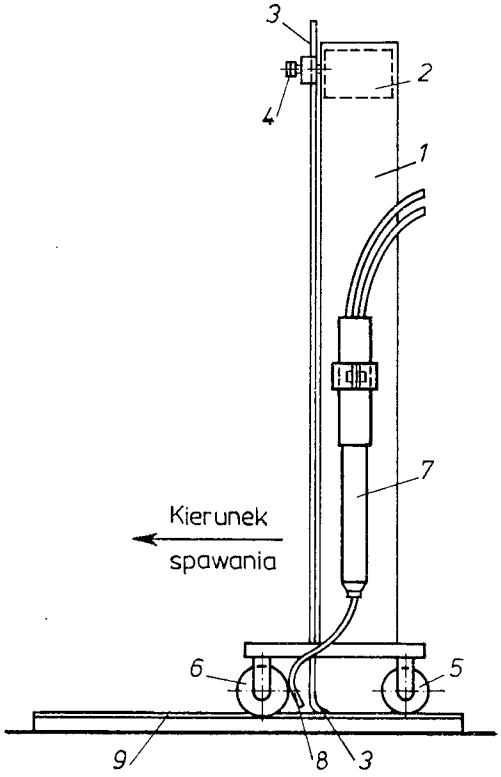
Rys. 2.20. Zależność wytrzymałości na rozciąganie R_r próbek PVC twardego, o grubości 5 mm, spawanych doczołowo spoiną V, od temperatury t_s powietrza opuszczającego palnik [2.40]

Spawanie można przeprowadzać ręcznie (rys. 2.21) bądź za pomocą odpowiednich spawarek. Spawarki zapewniają stałość temperatury, nacisku i prędkości spawania, co bezpośrednio polepsza wydajność i jakość spawania. Na rysunku 2.22 pokazano przykładowo jedną z popularnych spawarek z palnikiem elektrycznym.

Duże znaczenie ma spawanie, w którym nagrzewanie elementów spawanych odbywa się w strumieniu gorącego gazu, spoiwo zaś stanowi tworzywo w stanie plastycznym,

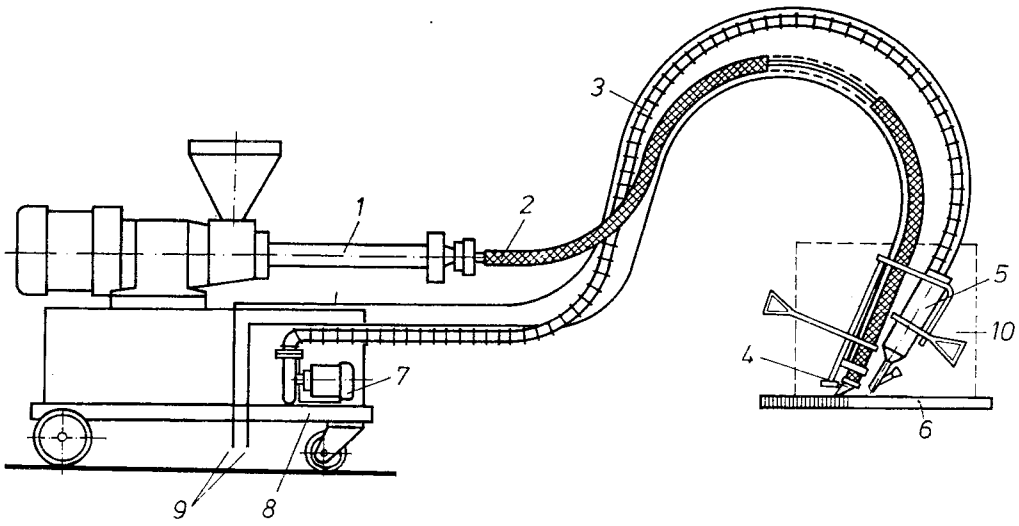


Rys. 2.21. Spawanie ręczne: *1* — palnik, *2* — pręt spawalniczy, *3* — płyty spawane



Rys. 2.22. Spawarka z palnikiem: *1* — rura prowadząca ciężarek, *2* — ciężarek przymocowany do pręta spawalniczego, *3* — pręt spawalniczy, *4* — łącznik pręta z ciężarkiem, *5* — koło jezdne, *6* — koło kierujące, *7* — palnik elektryczny, *8* — końcówka palnika, *9* — płyty spawane

otrzymywane z wytłaczarki (bliżej o procesie wytłaczania — rozdz. 3, p. 3.1.1). Na rysunku 2.23 przedstawiono spawarkę służącą do tego celu. W odróżnieniu od spawarki pokazanej na rys. 2.22 może ona nazywać się *spawarką bezpalnikową — wytłaczarkową*. Najważniejszą jej zaletą jest możliwość nałożenia całej spoiny w jednym przejściu głowicy spawalniczej, z prędkością spawania do 4 mm/s, niezależnie od grubości elementów łączonych. Stosuje się to spawanie do łączenia elementów o znacznych rozmiarach, np. wykładzin o grubości do 30 mm [2.20], dużych zbiorników wodnych lub na śmieci komunalne w terenie bądź rur o dużych średnicach.



Rys. 2.23. Spawarka bezpalnikowa — wytłaczarkowa: *1* — wytłaczarka, *2* — wąż tworzywa ogrzewany elektrycznie, *3* — wąż sprężonego powietrza, *4* — stopka spawalnicza do wygładzania spawu, *5* — palnik elektryczny, *6* — elementy spawane, *7* — dmuchawa gorącego powietrza, *8* — wózek, *9* — przewody elektryczne do zasilania palnika, dmuchawy i węża tworzywa, *10* — głowica spawalnicza [2.4, 2.33]

Trzeba jeszcze wspomnieć o możliwości spawania indukcyjnego, w którym pręt spawalniczy napełniony proszkiem metalowym umieszcza się w rowku spawalniczym w obszarze zmiennego pola magnetycznego. Tę odmianę spawania stosuje się efektywnie do łączenia części samochodowych [2.11].

2.2. Porowanie

Porowanie jest metodą przetwórstwa, w czasie której wskutek działania czynników fizyczno-chemicznych otrzymuje się przedmioty z tworzywa porowatego, na ogół o średnich i dużych rozmiarach, za pomocą narzędzi — form do porowania lub bez użycia narzędzi w ścisłym tego słowa znaczeniu, przy czym tworzywo wejściowe może mieć stan stały, plastyczny lub ciekły. Tak zdefiniowane porowanie jest jedną z metod otrzymywania wytworów z tworzyw porowatych. Według kryterium stosowania poroforu (gazu obojętnego, cieczy niskowrzących lub ciał stałych) otrzymywanie przedmiotów dzieli się na porowanie bez użycia poroforu, zwane spiekaniem i na porowanie z użyciem poroforu, zwane formowaniem rozrostowym. Pominięto porowanie bardzo proste, polegające na ubijaniu piany za pomocą mieszarek mechanicznych, stosowane do tworzyw mocznikowych oraz porowanie mające znaczenie raczej historyczne, np. poprzez wypłukiwanie składników rozproszonych (zwykle soli kuchennej) z litej masy tworzywa [2.39].

2.2.1. Spiekanie

Spiekanie polega na bezpośrednim wypełnianiu gniazda formy do spiekania tworzywem w stanie stałym w postaci granulek, nagrzaniu tworzywa do ustalonej temperatury, przetrzymaniu w tej temperaturze przez określony czas, ochłodzeniu i wyjęciu przedmiotu spiekanego — spieku z gniazda. Temperatura tworzywa powinna

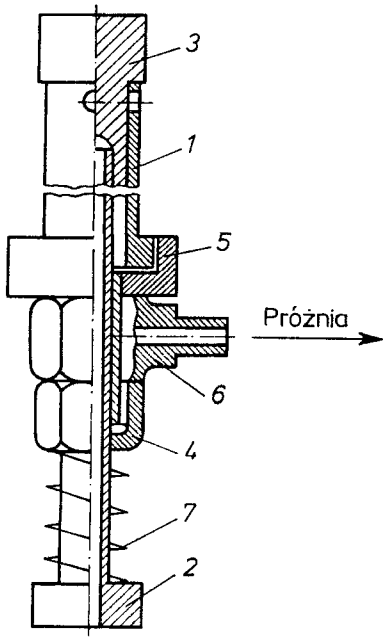
mieć taką wartość, aby nastąpiło uplastycznienie granulek i ich kohezyjne łączenie, czyli spiekanie, ale nie może zachodzić daleko posunięte uplastycznienie bądź stapianie. Istotą uzyskania porowatości spieku jest bowiem zachowanie komórek powietrza pomiędzy granulkami [2.5]. Czas trwania procesu zależy od właściwości cieplnych tworzyw i grubości ścianek spieków; powinien on być wystarczający do uzyskania danej temperatury w całej masie tworzywa. Ze zmniejszaniem się współczynnika przewodzenia ciepła oraz ze zwiększaniem grubości ścianek, wydłuża się czas spiekania. Temperatura i czas stanowią więc podstawowe parametry procesu spiekania — w zależności od ich wartości otrzymuje się spieki o różnej gęstości pozornej i związanej z tym przepuszczalności, jak również o różnych innych właściwościach (tabl. 2.1).

Tablica 2.1

Charakterystyka procesu spiekania i spieków porowatych według D. Ciesielskiej, K. Kelar i E. Bratborskiej [2.6, 2.21]

Cecha charakterystyczna	Polistyren			PMMA
	S	K	GM	
Temperatura spiekania, °C	150	140	150	160
Czas spiekania, min	120	120	60	120
Gęstość pozorna, kg/m^3	745	755	843	719
Porowatość, %	30	28	20	40
Przepuszczalność powietrza pod ciśnieniem 1 kPa, l/h	2025	1804	—	1538
Wytrzymałość na ściskanie, MPa	2,3	2,1	—	3,0

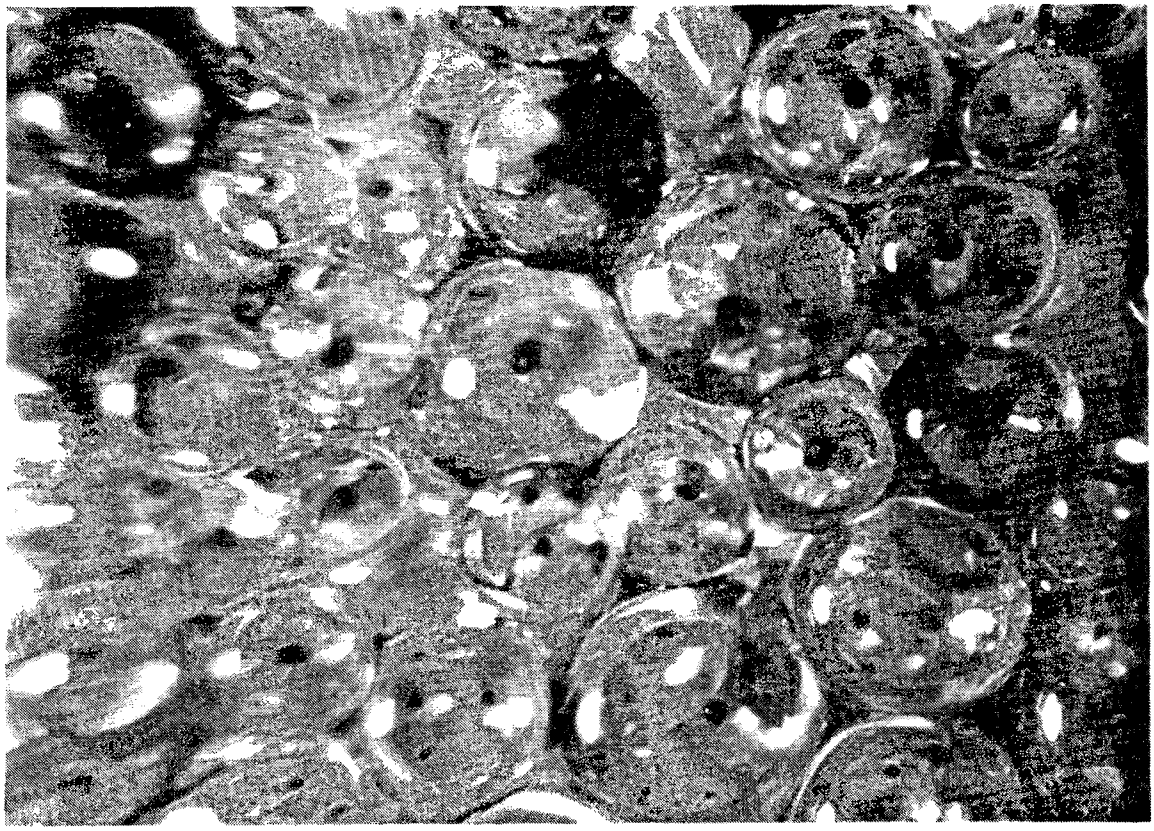
Uwaga: S — polistyren zwykły Owispol, grubość ścianek 20÷30 mm, K — polistyren modyfikowany udarowy, grubość ścianek 20÷30 mm, GM — polistyren szczepiony wysokoudarowy, przedmiot cienkościenny rurkowy, w przypadku PMMA grubość ścianek 20÷30 mm, wszystkie otrzymane spieki są sztywne.



Rys. 2.24. Forma do spiekania porowatych przepuszczalnych rurek z PS i PMMA: *1* — korpus zewnętrzny (rurka), *2* — korpus wewnętrzny (rurka), *3* — końcówka ustalająca, *4* — nakrętka, *5* — perforowane dno gniazda, *6* — króciec do pompy próżniowej, *7* — sprężyna [2.6]

Proces spiekania jest więc stosunkowo prosty, spieki są niemal całkowicie pozbawione naprężeń własnych i zachowują w bardzo dużym stopniu właściwości tworzywa wejściowego. Do jego wad można zaliczyć długi czas trwania i niezbyt dużą wytrzymałość spieków. Przeważają jednak zalety i proces ten stosuje się coraz częściej do otrzymywania filtrów, przepon i innych elementów przepuszczalnych.

Na rysunku 2.24 przedstawiono formę do spiekania rurek z PS i PMMA; inny przykład formy do spiekania przedmiotów płaskich można znaleźć w literaturze [2.18]. W celu zwiększenia efektywności przebiegu procesu spieniania, gniazdo można podłączyć do pompy próżniowej, odprowadzającej nadmiar powietrza spowodowany jego rozszerzalnością cieplną. Z kolei na rys. 2.25 jest pokazana makrostruktura spieku wykonanego z PS, z wyraźnie widocznymi komórkami powietrza pomiędzy granulkami.



Rys. 2.25. Struktura spieku wykonanego z polistyrenu zwykłego Owispol S (powiększenie 30 ×) [2.21]

2.2.2. Formowanie rozrostowe

Podstawowym warunkiem formowania rozrostowego jest rozkład poroforu będącego w tworzywie w stanie ciekłym lub stałym na gaz w temperaturze, w której tworzywo osiąga stan plastyczny bądź ciekły. W tych bowiem stanach skupienia ciśnienie gazu pochodzącego z poroforu może być większe od granicy plastyczności i w związku z tym powodować odkształcenie plastyczne — trwały rozrost tworzywa.

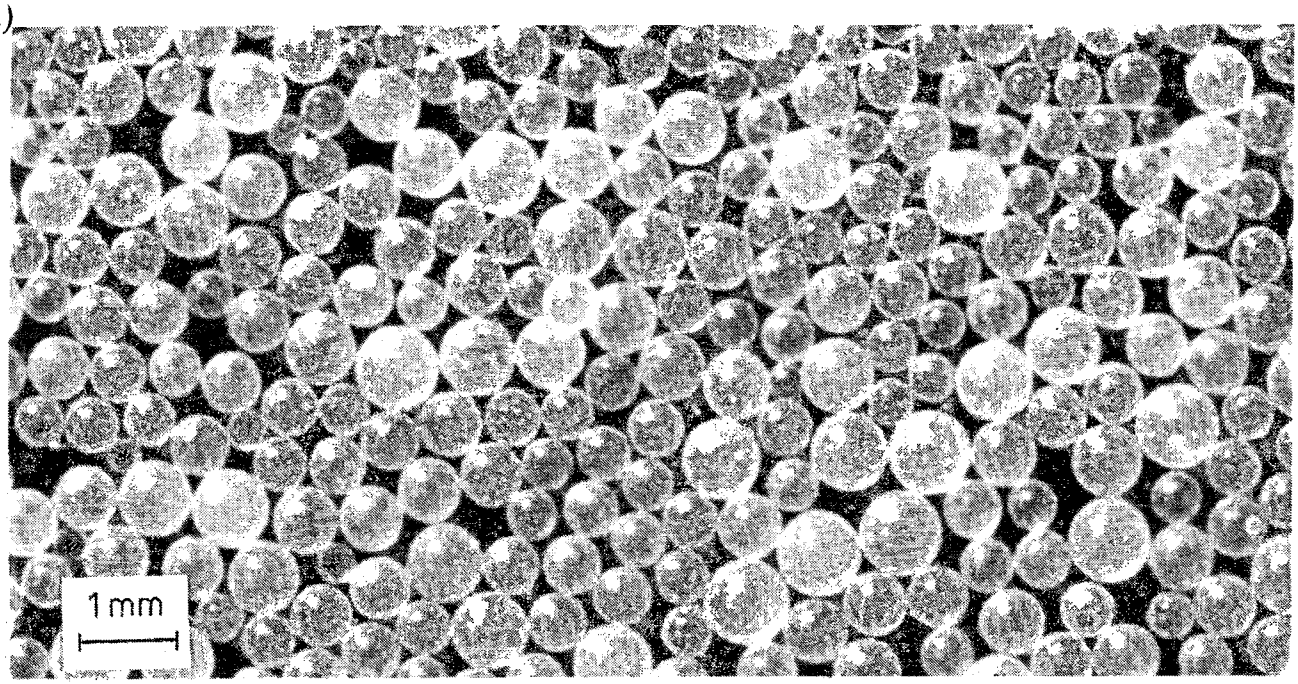
Rys. 2.26. Granulat PS: a) tworzywo wejściowe do procesu rozrastania wstępnego, b) tworzywo po procesie rozrastania wstępnego w parze wodnej o temperaturze 95°C w czasie około 10 minut

W zasadzie nie ma ograniczeń co do rodzaju tworzywa, które zamierza się formować rozrostowo; stosunkowo obszerny przegląd problematyki formowania rozrostowego podał już dość dawno S. Maciaszek [2.39].

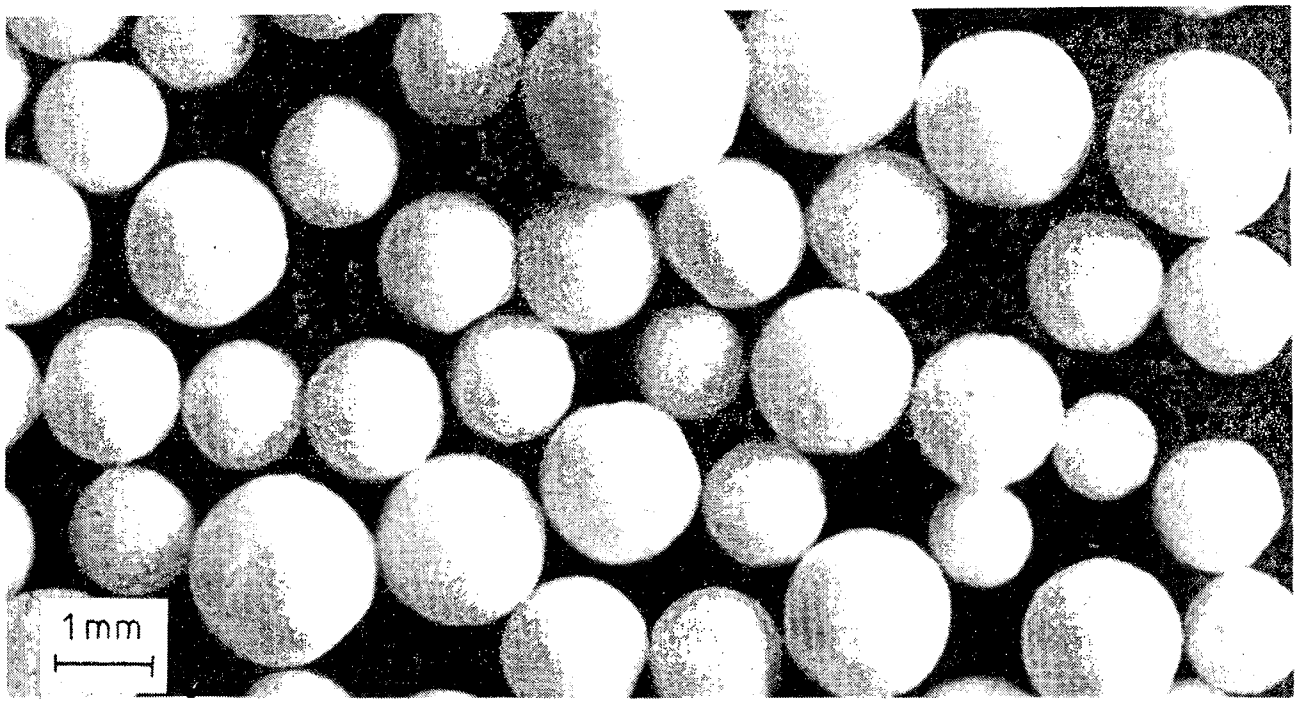
Formowanie rozrostowe polistyrenu

Polistyren porowaty, zwany w Polsce *styropianem,* zalicza się do tworzyw porowatych sztywnych i głównie otrzymuje z polistyrenu, wytwarzanego metodą polimeryzacji suspensyjnej, zawierającego porofory i mającego postać granulek o rozmiarach 0,1 ÷ 6,0 mm. Powszechnie stosowany proces formowania rozrostowego obejmuje: rozrastanie wstępne granulek, ich suszenie i sezonowanie oraz formowanie ostateczne przedmiotów.

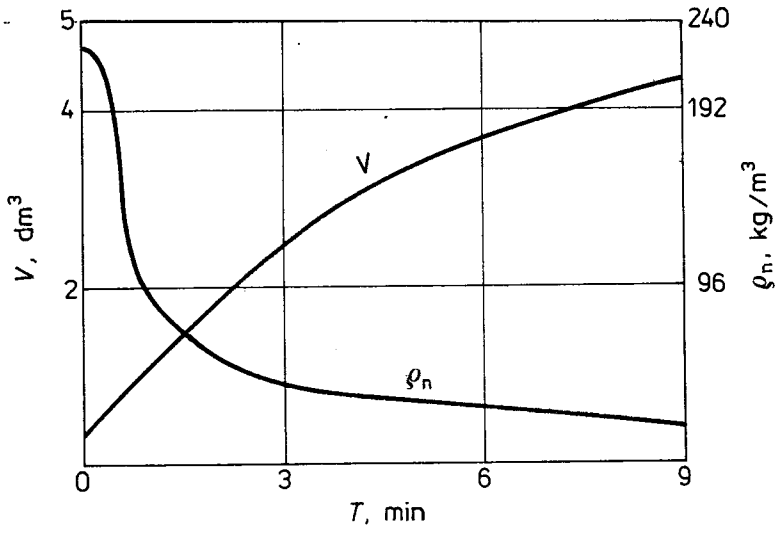
a)



b)



Podczas *rozrastania wstępnego*, zwanego również *ekspandowaniem wstępnym*, które przeprowadza się w temperaturze 95÷98°C, granulki PS ulegają częściowemu uplastycznieniu, a zawarty w nich porofor przechodzi w gaz. Rozprężający się gaz



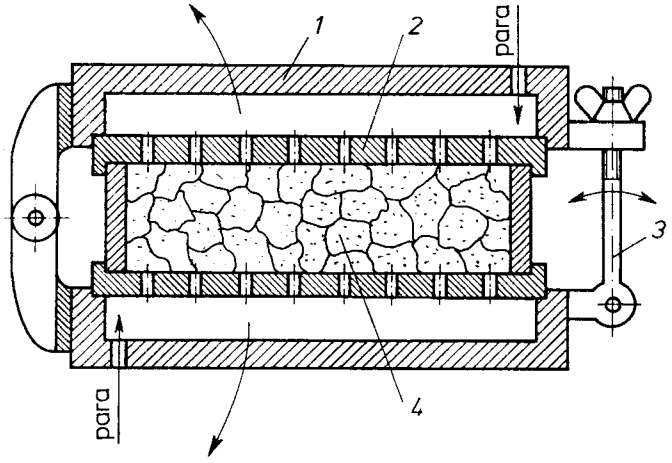
Rys. 2.27. Zależność gęstości nasypowej ρ_n granulatu PS po rozrastaniu wstępnym w wodzie o temperaturze 95°C i po wysuszeniu oraz zależność objętości V próbki PS o masie 100 g po formowaniu ostatecznym od czasu T rozrastania wstępnego [2.18]

znacznie powiększa rozmiary granulek (rys. 2.26) i nadaje im strukturę mikroporowatą, przy czym około 40% gazu ulatnia się. Istnieje ścisła zależność pomiędzy czasem rozrastania wstępnego a gęstością nasypową po rozrastaniu wstępnym (PN-90/C-89298) i objętością określonej masy PS porowatego (rys. 2.27). Im dłuższy czas rozrastania wstępnego, tym mniejsza jest gęstość pozorna formowanych później przedmiotów z PS porowatego. Rozrastanie wstępne wykonuje się w wodzie w układzie cyklicznym, np. w wannie, w wodzie w układzie ciągłym, np. w rurze z obracającym się ślimakiem, w parze wodnej w układzie cyklicznym, np. w zbiorniku, i wreszcie w parze wodnej w układzie ciągłym, np. w komorze z mieszadłem. Jeżeli gęstość pozorna przedmiotów z PS porowatego ma być większa od 100 kg/m^3, to rozrastanie wstępne staje się zbędne.

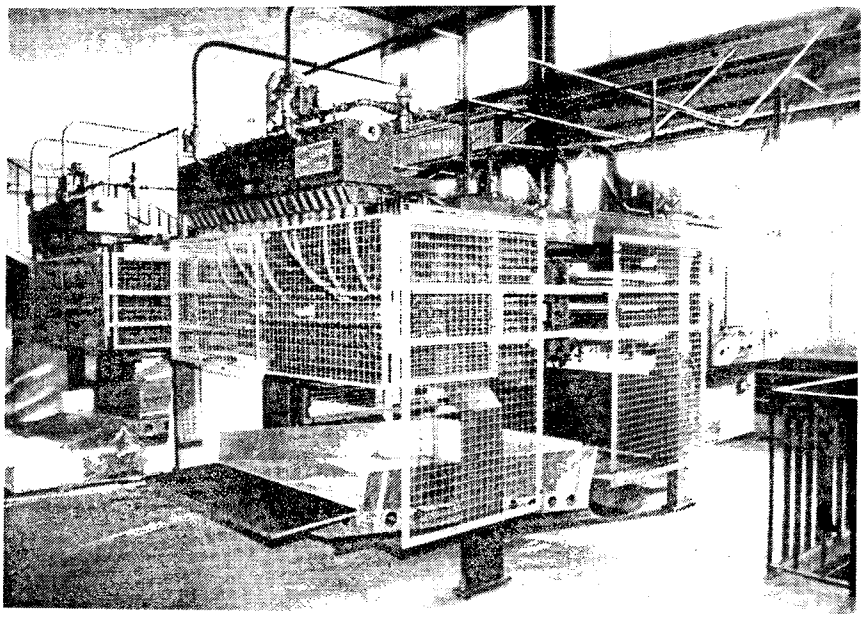
Granulki rozrośnięte wstępnie się suszy, np. na sitach drucianych w swobodnym obiegu powietrza o temperaturze otoczenia lub intensywniej w strumieniu powietrza o temperaturze 40÷45°C. Następnie przepuszcza się je przez sito wstrząsowe, w celu oddzielenia nieprawidłowo rozrośniętych granulek, gdyż pogarszają one jakość porowatego PS. W czasie suszenia pozostający w granulkach gaz opuszcza je i po ochłodzeniu do temperatury normalnej wykazują one nieznaczne podciśnienie. Aby zrównać ciśnienie wewnątrz granulek z ciśnieniem atmosferycznym, poddaje się je sezonowaniu w temperaturze otoczenia. Polega ono na umieszczeniu granulek w czasie od kilkunstu godzin do nawet 7 dób w zbiorniku, przez który przepływa swobodnie powietrze.

Formowanie ostateczne przedmiotów odbywa się w formach do porowania o podwójnych ściankach. Powierzchnie wewnętrzne ścianki wewnętrznej tworzą gniazdo formujące o kształcie i wymiarach odpowiadających przedmiotowi, a same ścianki są dziurkowane (perforowane). Średnica otworów wynosi około 1,5 mm. Gniazdo wypełnia się wysezonowanymi granulkami i, po zamknięciu go, wprowadza się między ścianki na czas od kilkunastu sekund do kilku minut parę wodną

o temperaturze 110÷115°C pod ciśnieniem 0,05÷0,08 MPa. Przed wprowadzeniem pary można w gnieździe wytworzyć podciśnienie [2.58]. Para ta przez otwory w ściankach gniazda bezpośrednio oddziałuje na PS. Zawarte w granulkach powietrze rozpręża się pod wpływem ciepła, przez co zwiększają się wymiary granulek, a ponieważ stają się one w tej temperaturze plastyczne, łączą się kohezyjnie ze sobą i wypełniają obszary powietrza zawarte pomiędzy nimi (rys. 2.28). Po ochłodzeniu i otwarciu formy z gniazda wyjmuje się gotowy przedmiot, o małej gęstości pozornej, na ogół w granicach 16÷60 kg/m^3. Do formowania stosuje się maszyny przetwórcze o różnym stopniu złożoności: od względnie prostych, obsługiwanych w znacznej mierze ręcznie, do całkowicie zautomatyzowanych (rys. 2.29).



Rys. 2.28. Forma do formowania ostatecznego przedmiotów z PS porowatego: *1* — ścianka zewnętrzna formy, *2* — dziurkowana ścianka wewnętrzna formy, *3* — śruba mocująca obie obrotowe części formy, *4* — PS porowaty



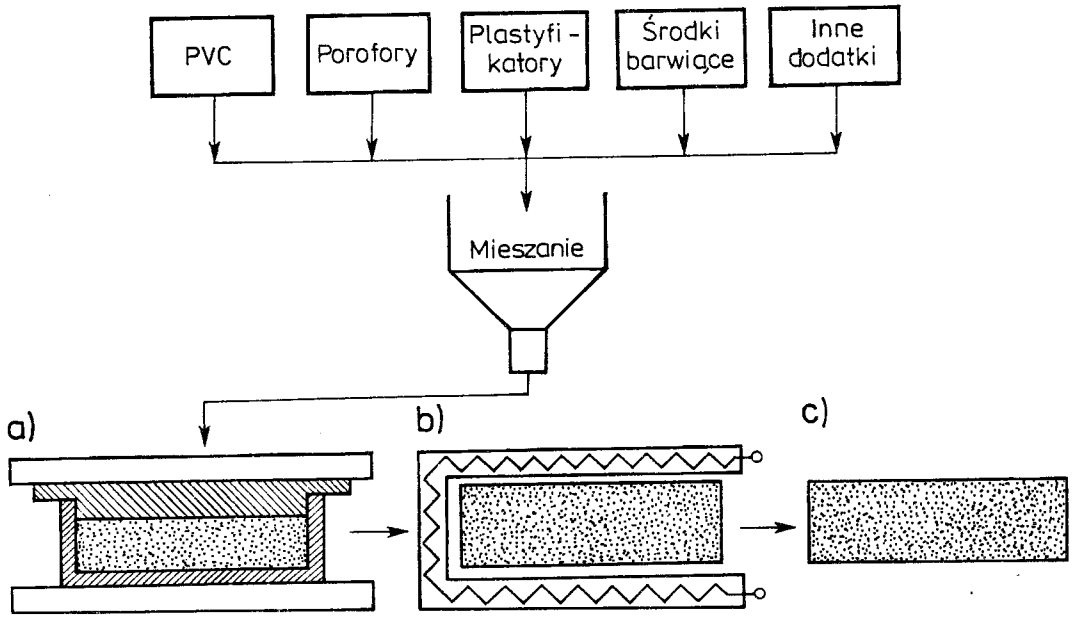
Rys. 2.29. Automat do formowania przedmiotów z polistyrenu porowatego o wydajności około 250 kg/h: $\rho = 20 \div 30$ kg/m^3, czas cyklu około 60 s, wymiary przedmiotu — długość 1420 mm, szerokość 630 mm i wysokość 260 mm (E.A. Heitz, Niemcy)

Formowanie rozrostowe polichlorku winylu

Porowaty polichlorek winylu może być sprężysty (elastyczny) lub sztywny, zależnie od zawartości plastyfikatorów (zmiękczaczy) i warunków porowania. Materiałami

wejściowymi do procesu formowania rozrostowego PVC są: polimer PVC o liczbie K — stałej Fikentschera wynoszącej 62÷64, porofory, plastyfikatory, środki barwiące, emulgatory oraz ewentualnie inne składniki dodatkowe. Gęstość pozorna porowatego PVC wynosi zazwyczaj 50÷150 kg/m^3 [2.77]. Porowaty PVC może być otrzymywany przede wszystkim w procesie ciśnieniowym lub bezciśnieniowym.

Proces ciśnieniowy formowania rozrostowego PVC polega na tym, że mieszaninę materiałów wejściowych sporządzoną na walcarce lub w mieszarce umieszcza się w gnieździe formy i po jej zamknięciu poddaje nagrzewaniu w prasie hydraulicznej pod ciśnieniem co najmniej 6 MPa. Gniazdo wypełnia się w około 80%, aby było miejsce na rozrastanie mieszaniny, i nagrzewa do temperatury rozkładu poroforu. Po rozkładzie następuje dalsze nagrzewanie aż do zżelowania mieszaniny. Żelowanie jest procesem fizycznym zachodzącym w układzie polimer PVC–plastyfikator. Następnie ochładza się formę do temperatury otoczenia, co powoduje uwięzienie gazu w tworzywie. Potem wyjęty z gniazda przedmiot poddaje się wygrzewaniu w temperaturze 75÷95°C w komorach powietrznych lub łaźniach wodnych. W tym czasie powoli zwiększa się objętość przedmiotu, aż do chwili zrównania ciśnienia wewnątrz porów z ciśnieniem atmosferycznym. W czasie ochładzania i w określonym czasie po nim przedmiot ulega skurczowi przetwórczemu pierwotnemu. Skurcz wtórny trwa nawet kilka miesięcy. Na rysunku 2.30 przedstawiono schematycznie przebieg opisywanego formowania roz-



Rys. 2.30. Schemat formowania rozrostowego PVC w procesie ciśnieniowym: a) nagrzewanie, żelowanie i ochładzanie mieszaniny w gnieździe formy pod ciśnieniem, b) wygrzewanie i rozrastanie przedmiotu, c) przedmiot z PVC porowatego

rostowego. W procesie ciśnieniowym uzyskiwać można zarówno sztywny, jak i sprężysty PVC porowaty, o porach zamkniętych.

Proces bezciśnieniowy polega na rozrastaniu mieszaniny, sporządzonej jak poprzednio, pod ciśnieniem atmosferycznym w podwyższonej temperaturze z jednocześnie przebiegającym żelowaniem mieszaniny. Jej gęstnienie powinno następować przed rozkładem poroforu, a żelowanie jednocześnie lub zaraz po wytworzeniu się najwięk-

szej ilości gazu. Zatem w procesie tym zasadnicze znaczenie ma odpowiednia temperatura. Skład mieszaniny oraz warunki prowadzenia procesu, zwłaszcza brak ciśnienia, powodują, że otrzymuje się tylko PVC porowaty, sprężysty, o porach otwartych. Składniki mieszaniny muszą być tak dobrane, aby uzyskać dużą ilość gazu w możliwie krótkim czasie. W przypadku prowadzenia procesu cyklicznego w otwartych formach, do których wlewa się mieszaninę, otrzymuje się na ogół gotowe do użytkowania przedmioty o żądanych właściwościach, strukturze, kształcie i rozmiarach. Gdy natomiast prowadzi się proces ciągły, wówczas mieszaninę wylewa się na taśmę przenośnika lub na podłoże umieszczone na taśmie i przeprowadza przez tunel ogrzewany, w którym następuje rozkład poroforu, wzrost objętości i żelowanie. Otrzymuje się w rezultacie długie bloki lub długie cienkie arkusze tworzywa, zdejmowane z taśmy bądź złączone trwale z podłożem. W ten sposób można powlekać PVC porowatym tkaniny, maty i różne przedmioty.

2.3. Rozdzielanie cieplne

Rozdzielanie cieplne, zwane również *termoelektrycznym,* polega na wprowadzeniu pod naciskiem napiętego, nagrzanego elektrycznie cięgna (drutu bądź taśmy) w tworzywo, które topi się w miejscu nacierania cięgna. Proces rozdzielania cieplnego zależy przede wszystkim od właściwości cieplnych tworzywa rozdzielanego, a głównie temperatury topnienia i przewodności cieplnej, natężenia i napięcia prądu nagrzewającego na ogół rezystancyjnie cięgno, prędkości nacierania tworzywa lub cięgna, rodzaju materiału cięgna i jego rozmiarów. Rozdzielanie to stosuje się do porowatych tworzyw termoplastycznych i do litych tworzyw termoplastycznych, głównie folii.

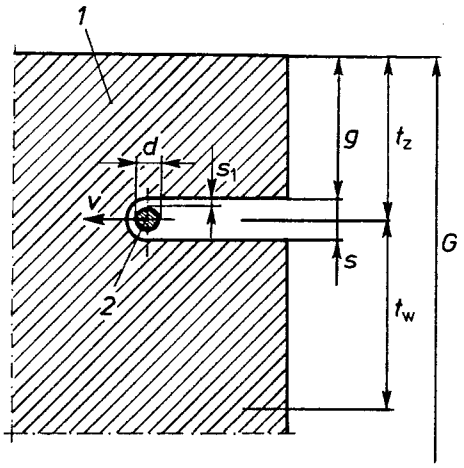
2.3.1. Rozdzielanie tworzyw porowatych

Przedmioty wytwarzane podczas porowania, przedstawionego w punkcie poprzednim, mają często kształt dużych bloków, z których otrzymuje się płyty o różnej grubości, np. jako elementy izolacji cieplnej, lub otrzymuje się przedmioty o żądanych kształtach i wymiarach, zależnie od zastosowania. Podstawową metodą rozdzielania tworzyw porowatych jest rozdzielanie cieplne z zastosowaniem cięgien nagrzewanych elektrycznie — rezystancyjnie [2.18, 2.68].

Wymiary przekroju poprzecznego cięgna wynikają w decydującym stopniu ze względów wytrzymałościowych, np. średnica cięgna o przekroju kołowym wynosi zazwyczaj $0{,}2 \div 0{,}8$ mm. Przyjmuje się mianowicie dopuszczalną strzałkę ugięcia napiętego cięgna podczas procesu rozdzielania. Wartość ta wynosi na ogół $30 \div 40$ mm przy długości cięgna 500 mm. Strzałka powstaje wskutek oporu mechanicznego tworzywa przeciw wnikaniu weń nagrzanego cięgna; rośnie z powiększaniem się gęstości ρ i prędkości v nacierania, maleje zaś ze wzrostem natężenia I prądu. Na przykład w przypadku PS porowatego o $\rho = 35{,}6$ kg/m^3 jest około 6 razy większa niż w przypadku PS porowatego o $\rho = 17{,}5$ kg/m^3, przy $I = 5$ A, $v = 12$ mm/s oraz

średnicy cięgna $d = 0{,}75$ mm. Małe wartości strzałki powodują znaczne naprężenia rozciągające w cięgnie i, co za tym idzie, stosowanie cięgien o dużym przekroju poprzecznym. Natomiast większe wartości strzałki, jakkolwiek wytrzymałościowo korzystniejsze, powodują powstanie znacznych błędów kształtu i położenia otrzymywanych przedmiotów, cięgno bowiem nie zachowuje stałości położenia, lecz nieznacznie „pływa".

Szerokość całkowitej szczeliny rozdzielania jest zawsze większa od szerokości cięgna (rys. 2.31) i ma istotne znaczenie. Im większa szczelina, tym wyższe koszty rozdzielania, gdyż objętość tworzywa odpowiadająca objętości szczeliny musi być stopiona, do czego należy wytworzyć odpowiedni strumień ciepła. Zależność szerokości s szczeliny całkowitej od podstawowych wielkości charakteryzujących proces



Rys. 2.31. Tworzenie się szczeliny całkowitej i względnej w procesie rozdzielania cieplnego: *1* — tworzywo rozdzielane, *2* — cięgno; pozostałe oznaczenia w tekście

rozdzielania pokazano przykładowo dla PS porowatego na rys. 2.32.

Przyjmując oznaczenia jak na rys. 2.31, można więc napisać

$$s\,(v, I) = d + 2s_1\,(v, I) \tag{2.2}$$

gdzie s_1 oznacza szerokość szczeliny względnej.

W celu określenia liczby i płyt o grubości g każda, otrzymywanych z bloku tworzywa o grubości G, można użyć następującego wzoru:

$$i = \frac{G}{g + s - 1} \tag{2.3}$$

lub

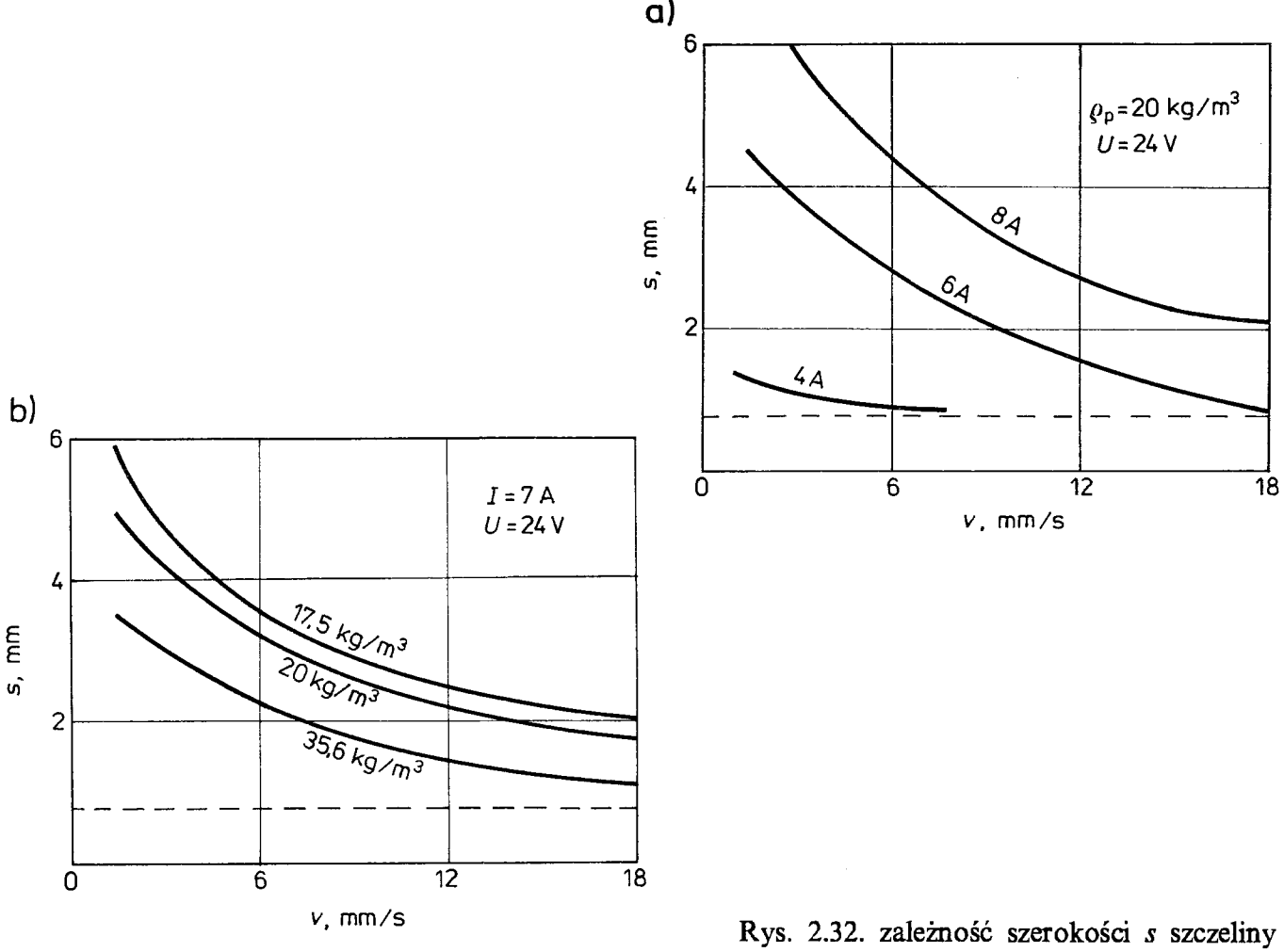
$$i = \frac{G}{g + d + 2s_1 - 1} \tag{2.4}$$

Pomiędzy grubością płyty i podziałką wewnętrzną t_w, potrzebną do nastawiania na maszynie do rozdzielania, istnieje następująca zależność:

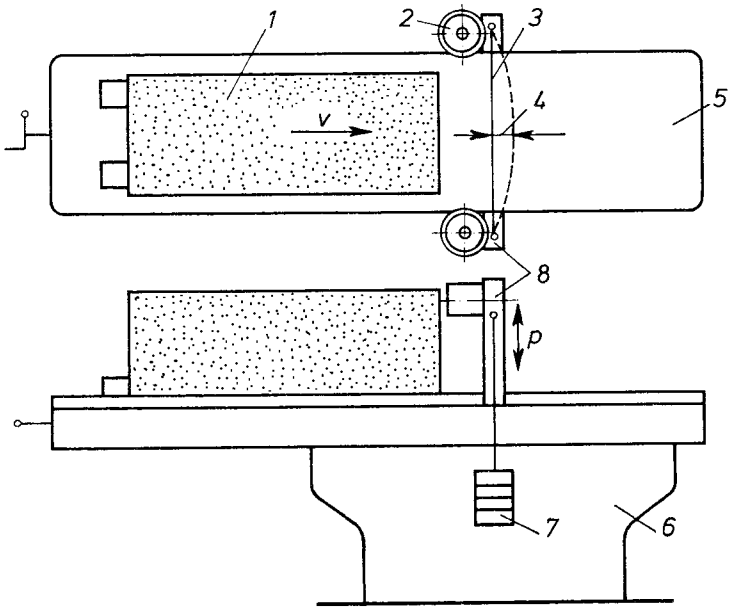
$$t_w = g + d + 2s_1 \tag{2.5}$$

a pomiędzy grubością płyty i podziałką zewnętrzną t_z

$$t_z = g + \frac{d}{2} + s_1 \tag{2.6}$$



Rys. 2.32. zależność szerokości s szczeliny całkowitej od prędkości v nacierania PS porowatego: a) dla różnych wartości natężenia prądu przy stałej gęstości pozornej tworzywa, b) dla tworzyw o różnej gęstości pozornej przy stałym prądzie (według W. Przybylskiego [2.68])



Rys. 2.33. Schemat rozdzielarki cieplnej: *1* — przedmiot rozdzielany z tworzywa porowatego, *2* — wentylatory do nadmuchu powietrza na nie pracujące części cięgna, *3* — cięgno, *4* — strzałka ugięcia cięgna, *5* — stół rozdzielarki, *6* — korpus mieszczący napędy i układ elektryczny, *7* — ciężar napinający cięgno, *8* — rama mocująca cięgno, v — prędkość nacierania tworzywa, p — posuw poprzeczny

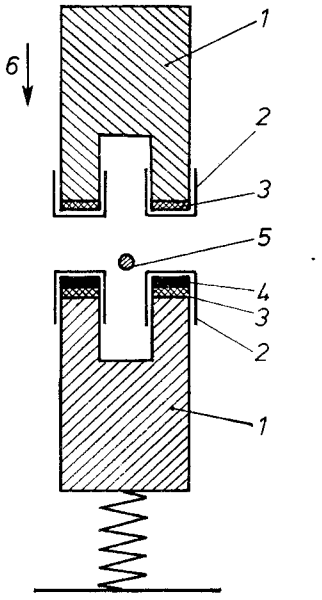
Ponieważ w procesie rozdzielania wartość d jest stała, szerokość szczeliny zmniejsza się poprzez zmniejszenie wartości s_1, przeprowadzane poprawnym doborem warunków rozdzielania.

Na rysunku 2.33 przedstawiono maszynę do rozdzielania cieplnego, zwaną rozdzielarką cieplną, z jednym cięgnem i ruchem nacierającym tworzywa rozdzielanego. Części nie pracujące cięgna powinny być chłodzone w strumieniu zimnego powietrza. Przedmioty rozdzielane nie muszą być izolowane, gdyż tworzywa rozdzielane są dobrymi dielektrykami. Stosuje się także, zwłaszcza w produkcji wielkoseryjnej, rozdzielarki z kilkoma cięgnami, jak również z ich ruchem nacierającym i posuwem poprzecznym do nastawiania grubości płyt, przy nieruchomym tworzywie.

2.3.2. Rozdzielanie folii

Folie z tworzyw termoplastycznych rozdziela się cieplnie jednocześnie z ich łączeniem metodą zgrzewania, a więc proces rozdzielania zachodzi w co najmniej dwu foliach będących w bezpośrednim kontakcie ze sobą.

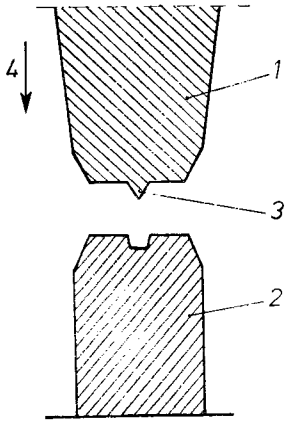
Procesy rozdzielania cieplnego i zgrzewania mogą być zintegrowane do tego stopnia, że niemożliwe staje się ich odrębne rozpatrywanie, jak np. proces pokazany na rys. 2.1, zakwalifikowany umownie do zgrzewania za pomocą nagrzanej listwy. Ale integracja ta może być mniejsza, choć nadal znaczna. W tych przypadkach na ogół wymagana jest specjalna konstrukcja narzędzia, które można nazwać narzędziem do rozdzielania ze zgrzewaniem. Na rysunku 2.34 jest pokazane rozwiązanie układu

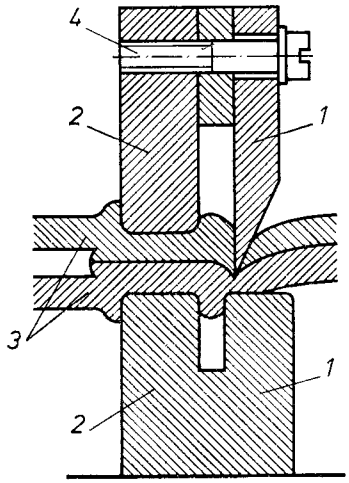


Rys. 2.34. Układ listew rozdzielająco-zgrzewających do jednoczesnego rozdzielania cieplnego i zgrzewania impulsowego: *1* — korpusy listew, *2* — przekładki, *3* — podłoże, *4* — element grzejny rezystancyjny, *5* — cięgno nagrzewane rezystancyjnie (drut), *6* — kierunek ruchu roboczego listwy

listew do jednoczesnego rozdzielania cieplnego i zgrzewania impulsowego; mają one dwie równoległe powierzchnie robocze do identycznego zgrzewania, a pomiędzy nimi znajduje się cięgno nagrzewane rezystancyjnie, powodujące rozdzielanie cieplne folii. Źródłem ciepła do rozdzielania nie musi być prąd elektryczny, lecz mogą być nim również ultradźwięki (rys. 2.35). Niekiedy nie zachodzi potrzeba rozdzielania folii, lecz powodowanie istotnego zmniejszenia jej grubości — pocienienia, co ułatwia późniejsze rozdzielanie poprzez rozdarcie miejsca pocienionego. Do tego celu można stosować układ pocieniająco-zgrzewający, składający się z listew do zgrzewania pojemnościowego i elementów do pocieniania cieplno-mechanicznego (rys. 2.36).

Rys. 2.35. Schemat układu sonotroda–kowadło do jednoczesnego rozdzielania cieplnego i zgrzewania ultradźwiękowego: *1* — sonotroda, *2* — kowadło, *3* — taśma klinowa do rozdzielania cieplnego folii, *4* — kierunek ruchu roboczego sonotrody





Rys. 2.36. Układ listew pocieniająco-zgrzewających do jednoczesnego pocieniania cieplno-mechanicznego i zgrzewania pojemnościowego: *1* — elementy do pocieniania cieplno-mechanicznego, *2* — listwy (elektrody kondensatora), *3* — folie, *4* — śruba do mocowania elementu (*1*) oraz regulacji pocienienia

2.4.. Suszenie i podgrzewanie

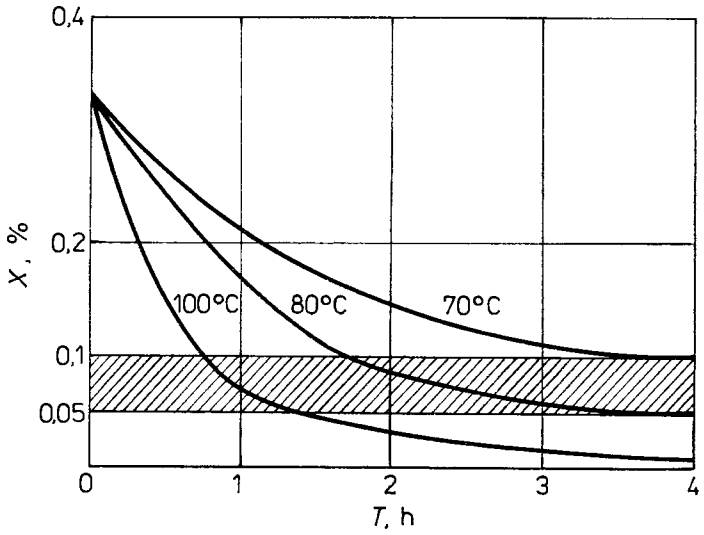
Suszenie i podgrzewanie charakteryzują się tym, że tworzywo przetwarzane poddaje się w określony sposób i przez dany czas działaniu ciepła, zazwyczaj w powietrzu. Podstawowym celem suszenia jest odparowanie zawartej w tworzywie cieczy, z czym wiąże się podwyższenie temperatury tworzywa, zmiana właściwości oraz często także struktury. Głównym celem podgrzewania jest natomiast zmiana właściwości i struktury tworzywa poprzez podwyższenie jego temperatury, z czym wiązać się może odparowanie cieczy.

2.4.1. Suszenie

Podstawową zasadą przy suszeniu jest zapewnienie szybkiego i równomiernego odparowania wilgoci z tworzywa w sposób jak najbardziej zachowawczy. Przestrzeganie tej zasady nie jest jednak łatwe, tworzywa bowiem odznaczają się małymi współczynnikami przewodzenia i przejmowania ciepła, a intensywność odparowywania wilgoci nie jest jednakowa. Suszenie jest procesem przetwórstwa, który przeprowadza się bądź jako operację wstępną do innych procesów, głównie procesów przetwórstwa fizyczno-chemicznego II rodzaju, bądź jako operację w licznych procesach przetwórstwa chemiczno-fizycznego.

W metodach PFC II na ogół dąży się do określonej małej wilgotności tworzywa wejściowego, którą przyjmuje się jako dopuszczalną lub jako optymalną. Dla

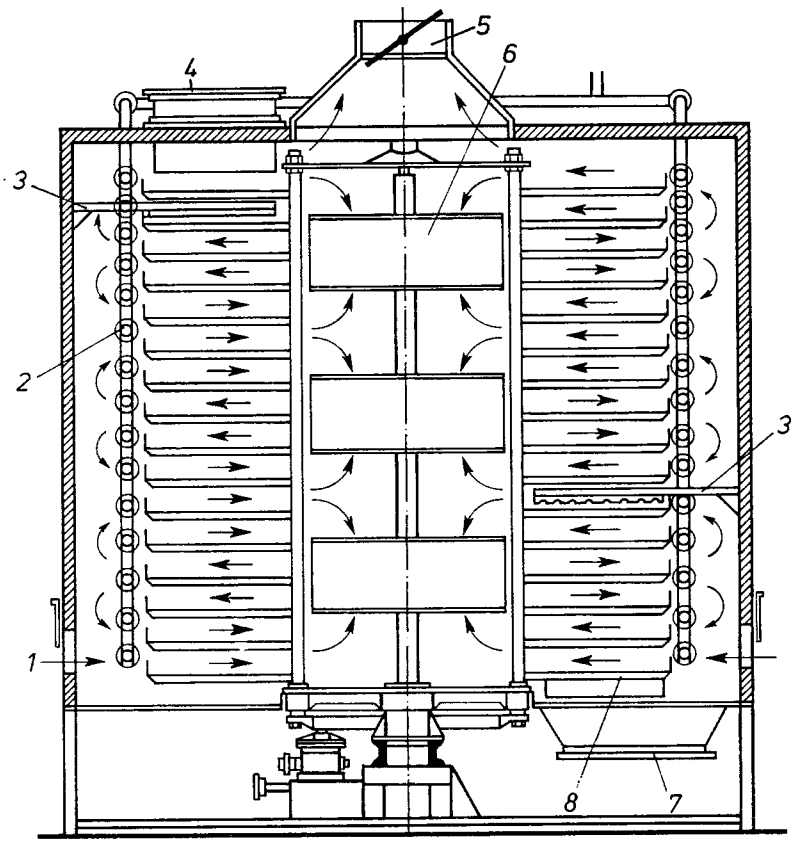
większości tworzyw termoplastycznych operuje się pojęciem wilgotności dopuszczalnej, która wynosi zazwyczaj 0,01÷0,5% (rys. 2.37), a dla tworzyw utwardzalnych



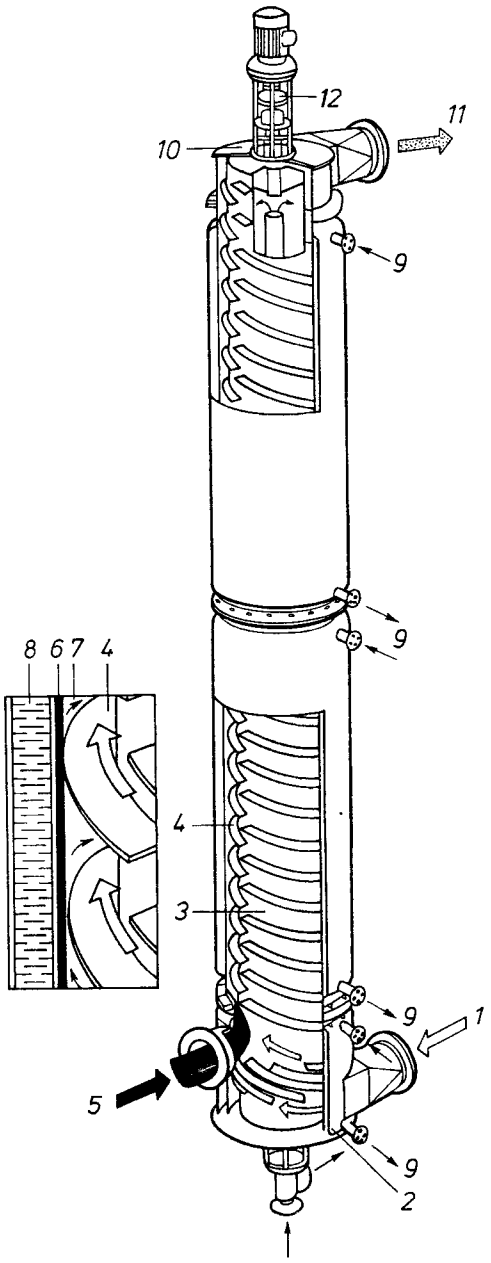
Rys. 2.37. Zależność wilgotności X tworzywa ABS od czasu T suszenia w różnej temperaturze; obszar zakreskowany obejmuje dopuszczalną zawartość wilgoci przy przetwórstwie

— pojęciem wilgotności optymalnej, która na ogół zawiera się w granicach 3÷5%. Wilgotność ustala się głównie w zależności od rodzaju tworzywa przetwarzanego oraz metody przetwórstwa. Większa wilgotność powoduje, że wilgoć, która w temperaturze przetwórstwa przechodzi w stan gazowy i wydziela się na zewnątrz lub pozostaje w przedmiocie, stwarza niedopuszczalne błędy i anomalie przedmiotu, jak również powoduje przyspieszone zużywanie korozyjne i erozyjne elementów maszyn i narzędzi stykających się z tworzywem przetwarzanym. Może również działać katalitycznie na degradację tworzywa [2.15]. Natomiast mniejsza wilgotność zmniejsza przenoszenie ciepła do tworzywa i, co jest z tym związane, utrudnia uplastycznianie tworzywa; przyjmuje się z pewnym uproszczeniem, że mała wilgotność, szczególnie w odniesieniu do tworzyw utwardzalnych, działa jak środki smarujące i plastyfikujące. Czynnikiem suszącym jest z reguły powietrze, ale w przypadku tworzyw podatnych na utlenianie czynnikiem tym może być gaz obojętny, przede wszystkim azot.

Suszenie przeprowadza się w suszarkach o różnych konstrukcjach i zasadach działania [2.66, 2.76]. Najdawniej stosowane, aczkolwiek niezbyt odpowiednie, głównie ze względu na złą jakość suszenia i małą sprawność energetyczną, są suszarki komorowe i tunelowe bez ruchu tworzywa w czasie suszenia [2.45]. Popularne są suszarki komorowe konwekcyjne, których nowszą odmianę stanowią suszarki z układem pochyłych, drgających półek, w których tworzywo suszone przesypuje się w kierunku zgodnym z nachyleniem półek, oraz suszarki bębnowe, w których również tworzywo ulega przesypywaniu. Na rysunku 2.38 przedstawiono wydajną i dobrze suszącą suszarkę turbinowo-półkową. Tworzywo suszone przesypuje się kaskadowo w miarę obrotu półek z jednej półki na drugą i w tym czasie styka się z nagrzanym powietrzem, przemieszczającym się pod działaniem turbin w kierunku pokazanym na rysunku. Na wyróżnienie zasługuje suszarka śrubowo-pneumatyczna, której działanie zilustrowano na rys. 2.39. Suszarka ta odznacza się stosunkowo małymi rozmiarami przy dużej wydajności — według firmy Werner und Pfleiderer (Niemcy) wydajność suszarki wynosi 50 000÷60 000 kg/h przy zużyciu powietrza suszącego



Rys. 2.38. Schemat suszarki turbinowo-półkowej: *1* — wlot powietrza, *2* — nagrzewanie parowe, *3* — łapy zgarniające, *4* — doprowadzenie wilgotnego tworzywa, *5* — wylot powietrza, *6* — turbiny powietrzne, *7* — odprowadzenie wysuszonego powietrza, *8* — półki



Rys. 2.39. Schemat suszarki śrubowo-pneumatycznej: *1* — wlot powietrza suszącego, *2* — pokrywa dolna, *3* — rdzeń, *4* — owiewki śrubowe, *5* — wprowadzenie tworzywa suszonego, *6* — warstwa tworzywa suszonego, *7* — kanał suszarki, *8* — płaszcz grzejny lub chłodzący, *9* — dopływ i wypływ czynnika grzejnego lub chłodzącego, *10* — pokrywa górna, *11* — wyprowadzenie tworzywa wysuszonego i powietrza, *12* — napęd rdzenia [2.34]

35 000 ÷ 540 000 kg/h. Interesujące rezultaty uzyskuje się podczas suszenia w złożu fluidalnym [2.1].

W metodach PCF chodzi najczęściej o całkowite odparowanie rozpuszczalników ze stosunkowo cienkich warstw tworzywa (np. podczas nanoszenia, klejenia, drukowania). Dość często stosuje się w tych przypadkach suszarki promiennikowe.

2.4.2. Podgrzewanie

Tworzywa podgrzewa się, w rozumieniu metody przetwórstwa, w dwu podstawowych przypadkach:

— podgrzewania folii termokurczliwych w celu wywołania w nich skurczu cieplnego,

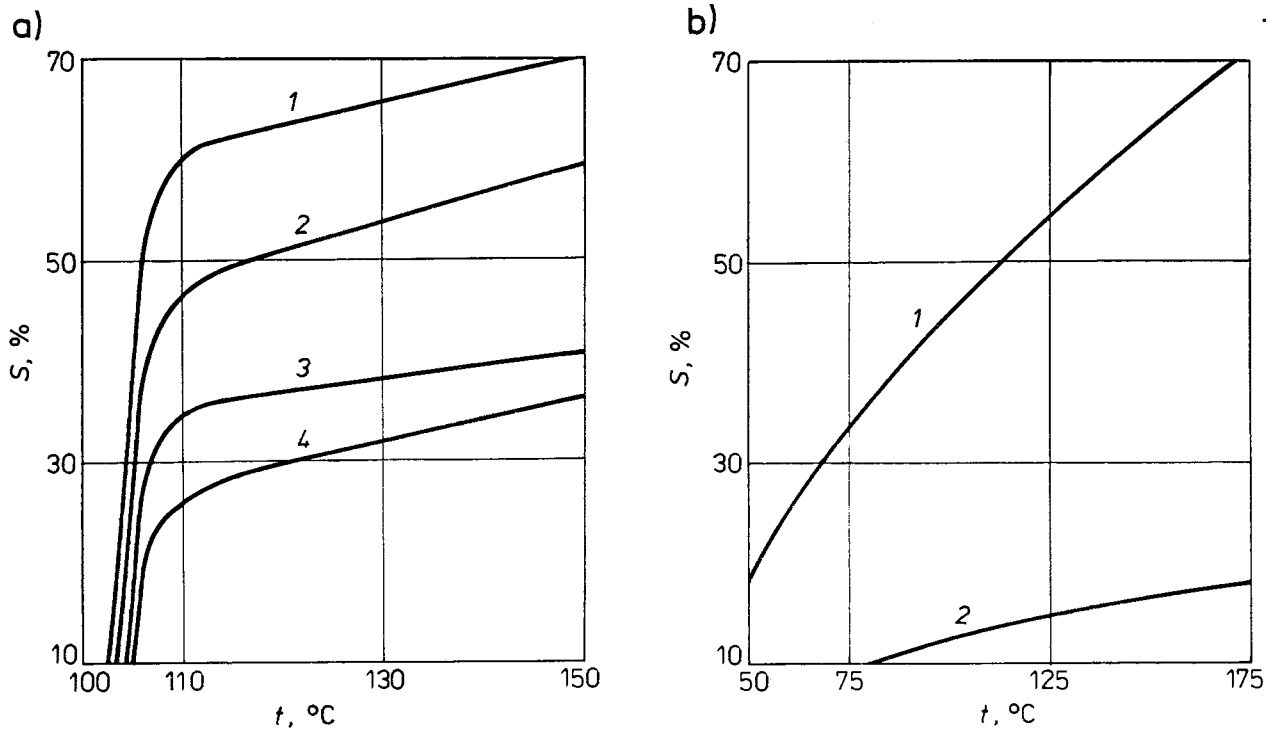
— podgrzewania (nagrzewania wstępnego) tworzyw w postaci granulatu, proszku lub tabletek, jako materiału wejściowego, głównie do wytłaczania, wtryskiwania i prasowania.

Skurcz cieplny folii charakteryzuje stopień skurczu S, będący miarą zdolności folii do kurczenia się pod wpływem ciepła, definiowany jako zmniejszenie wymiarów danej powierzchni folii, wyrażone w procentach wymiarów początkowych

$$S = \frac{L_0 - L_1}{L_0} 100\% \tag{2.7}$$

gdzie L_0 oznacza długość początkową danej powierzchni folii, natomiast L_1 — długość po podgrzaniu. Skurcz cieplny jest rezultatem wyzwalania się odkształceń folii, powstałych podczas jej przetwórstwa, spowodowanych deformacją kątów między wiązaniami łączącymi sąsiednie atomy w makrocząsteczce oraz częściowo rozwijaniem i wyprostowywaniem się makrocząsteczek. Termokurczliwymi przyjęto nazywać folie, które mają ściśle określony i duży (do 80%) stopień skurczu, podczas gdy wielkość ta dla folii zwykłych jest raczej przypadkowa i mała [2.8, 2.36]. Otrzymuje się je przede wszystkim metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniem bądź metodą orientowania, przy czym w ostatnim przypadku możliwe jest uprzednie jej napromienianie. Stopień skurczu danej folii termokurczliwej, zarówno w kierunku wzdłużnym, jak i poprzecznym, zależy głównie od temperatury i czasu działania ciepła. Na ogół w przypadku folii otrzymywanej metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniem stopień skurczu powiększa się nierównomiernie ze wzrostem temperatury, a w przypadku folii orientowanej — równomiernie (rys. 2.40). Folie termokurczliwe stosuje się przede wszystkim do zabezpieczania jednostek ładunkowych na paletach, opakowań zbiorczych i do pakowania przedmiotów o dużych rozmiarach [2.36]. W każdym z tych przypadków po owinięciu folią zestawu, folię podgrzewa się, co powoduje obkurczanie się folii na zestawie. Temperatura folii podczas obkurczania zależy w największym stopniu od rodzaju tworzywa, z jakiego folia jest wykonana, i żądanego stopnia skurczu — zawiera się ona zazwyczaj w granicach 105 ÷ 240°C. W czasie obkurczania występuje naprężenie skurczu, które waha się od 0,35 do 4 MPa (tabl. 2.2).

Podgrzewanie folii termokurczliwych przeprowadza się za pomocą dmuchaw przenośnych (również ręcznych), ram i kolumn grzejnych, komór grzejnych oraz tuneli grzejnych. Urządzenia te są na ogół częściami linii technologicznych do pakowania. Podgrzewanie folii w wymienionych urządzeniach odbywa się w gorącym powietrzu ogrzewanym elektrycznie — rezystancyjnie lub poprzez spalanie gazu palnego bądź oleju opałowego. Podgrzewanie folii może także zachodzić wskutek bezpośredniego działania na nią promieniowania podczerwonego. Na rysunku 2.41 są pokazane przykładowo dwa tunele grzejne o działaniu ciągłym.



Rys. 2.40. Zależność stopnia skurczu S od temperatury t folii: a) PE o grubości 40 μm, otrzymanej metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniem; *1* i *3* — po czasie podgrzewania 20 s, *2* i *4* — po czasie podgrzewania 3 s, *1* i *2* — w kierunku wzdłużnym, *3* i *4* — w kierunku poprzecznym, b) PVC, otrzymanej metodą orientowania; *1* — w kierunku wzdłużnym, *2* — w kierunku poprzecznym [2.36]

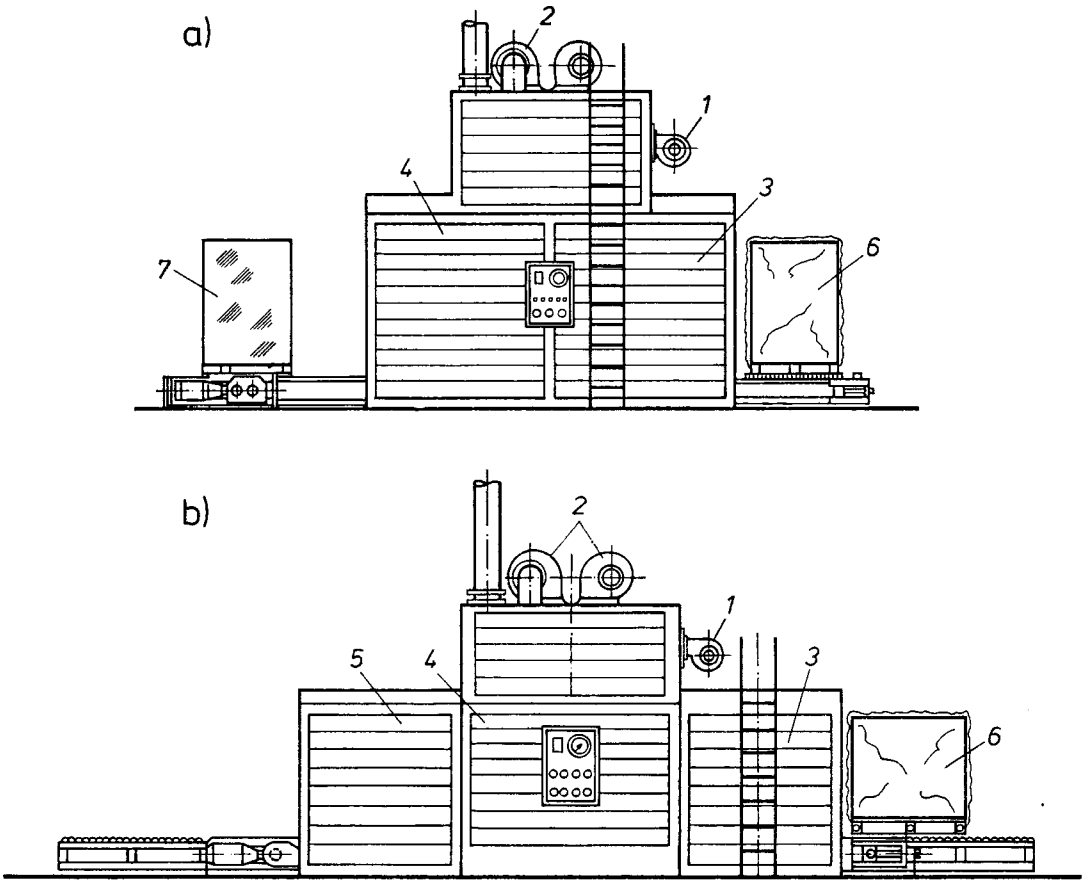
Tablica 2.2

Temperatura i naprężenie skurczu cieplnego niektórych folii [2.38]

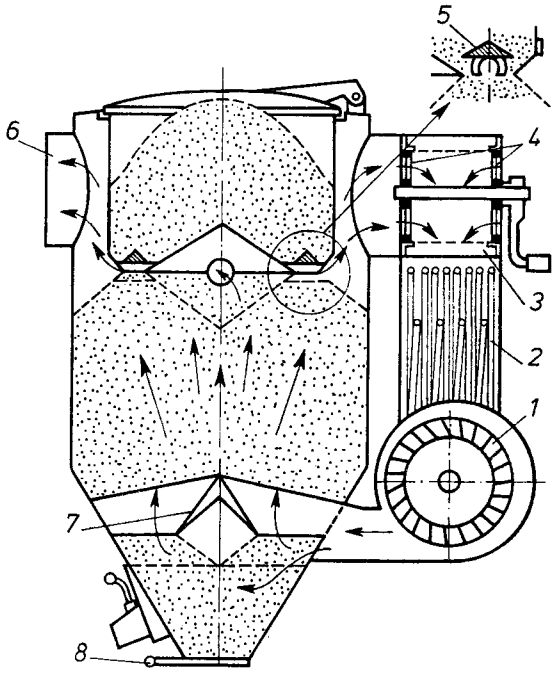
Rodzaj folii	Temperatura skurczu, °C	Naprężenie skurczu, MPa
PE wytłaczana i rozdmuchiwana	120÷240	0,35÷0,7
PE orientowana	110÷175	1,4÷3,5
PP	150÷230	2,0÷4,0
PS	130÷160	0,7÷4,0
PVC	105÷155	1,0÷2,1
VC/VDC	95÷150	0,35÷1,4

Podgrzewanie tworzywa wejściowego, w postaci granulatu bądź proszku, do procesu wytłaczania, wtryskiwania i innych procesów, zazwyczaj łączy się z suszeniem. W przypadku wytłaczania i wtryskiwania jest rozpowszechnione suszenie z podgrzewaniem zachodzące w specjalnych zasobnikach susząco-podgrzewających, mocowanych w miejscu zasobników zwykłych. Tworzywo jest w zasobniku poddawane działaniu strumienia gorącego powietrza (60÷120°C), nagrzewanego od grzejnika elektrycznego rezystancyjnego, które krąży w znacznym stopniu w obiegu zamkniętym (rys. 2.42). Zasobnik susząco-podgrzewający jest na ogół wyposażony w specjalne separatory magnetyczne, pozwalające wychwytywać z tworzywa przypadkowe wtrącenia metalowe.

Szczególne znaczenie ma podgrzewanie tworzywa wejściowego utwardzalnego, w postaci tabletek, do procesu prasowania tłocznego i przetłocznego. Podgrzewanie to



Rys. 2.41. Tunele grzejne o działaniu ciągłym, w których powietrze ogrzewa się wskutek spalania gazu palnego: a) dwusegmentowy, b) trójsegmentowy; *1* — palnik, *2* — wentylator, *3* — segment obkurczania wstępnego, *4* — segment obkurczania zasadniczego, *5* — segment obkurczania wykańczającego, *6* — zestaw przed pakowaniem, *7* — zestaw po pakowaniu (Micron Errani, Włochy)



Rys. 2.42. Zasobnik susząco-podgrzewający Continator firmy Engel (Austria): *1* — wentylator, *2* — grzejnik elektryczny, *3* — filtr powietrza, *4* — zawór powietrzny, *5* — separator magnetyczny, *6* — króciec odprowadzający, *7* — rozdzielacz powietrza, *8* — zasuwa

skraca cykl procesu prasowania o 20÷60%, zwiększa szybkość zamykania formy prasowniczej do 50% i więcej, co łącznie zwiększa istotnie wydajność procesu prasowania. Podgrzewanie polepsza również większość właściwości wyprasek (tabl. 2.3). Przeprowadza się je w temperaturze 80÷200°C w czasie od kilku do kilkunastu minut i dłuższym, w podgrzewarkach pojemnościowych, promiennikowych i rezystancyjnych.

Tablica 2.3

Wpływ podgrzewania na niektóre właściwości wyprasek tłocznych z tworzyw fenolowych w stosunku do wskaźników początkowych przyjętych za 100 [2.63]

Temperatura prasowania, °C	Sposób prasowania	Wytrzymałość na zginanie	Twardość	Temperatura ugięcia według Martensa	Higroskopijność w czasie 24 h
175	bez podgrzewania	100	100	100	100
	z podgrzewaniem	109,4	125	110	74
190	bez podgrzewania	105	120	101,7	61
	z podgrzewaniem	117,2	140	124,3	50

Uwaga: Podgrzewanie prowadzono w takiej samej temperaturze, co prasowanie w czasie 6 minut.

2.5. Ulepszanie fizyczne

Celem ulepszania fizycznego jest nadawanie wytworom z tworzyw lepszych właściwości, przede wszystkim fizykochemicznych i fizycznych, głównie adhezyjnych, mechanicznych i cieplnych, zmniejszenie i ustabilizowanie wymiarów, kształtu i położenia oraz anomalii materiałowych i powierzchniowych, poprzez zachodzące w nich procesy zasadniczo o charakterze fizycznym. Ulepszanie przeprowadza się w odniesieniu do wytworów otrzymanych innymi metodami przetwórstwa, najczęściej za pomocą wtryskiwania, wytłaczania, prasowania, odlewania i kalandrowania, jako jedną z operacji końcowych. Można je podzielić tradycyjnie, choć niezbyt zgodnie z teorią klasyfikacji, na ulepszanie cieplne, ulepszanie radiacyjne i aktywowanie warstwy wierzchniej.

2.5.1. Ulepszanie cieplne

Ulepszenie cieplne* polega na poddawaniu przedmiotów z tworzywa działaniu ciepła przez dany czas w określonym ośrodku. Pierwsze i jak dotychczas najszersze zastosowanie znalazło ono przy wytwarzaniu włókien chemicznych [2.2]. Znaczenie ulepszania cieplnego rośnie w miarę coraz wyższych wymagań stawianych przedmiotom z tworzyw [2.44]. Obecnie ulepszanie jest na ogół konieczne w przypadku kół

* Do omawianego procesu stosuje się w literaturze kilka nazw, np.: obróbka cieplna, obróbka termiczna, modyfikacja cieplna, kondycjonowanie, termostabilizacja, stabilizacja termiczna, stabilizacja termiczno-ciśnieniowa.

zębatych, łożysk ślizgowych, prowadnic i wielu innych części do maszyn i urządzeń przemysłu maszynowego, elektrotechnicznego i lotniczego. Literatura dotycząca ulepszania cieplnego jest stosunkowo obszerna i zawiera wiele poważnych prac badawczych. W Polsce ulepszaniem cieplnym zajmowało się lub zajmuje kilka osób, ale bardzo ważne wydają się prace J. Koszkula [2.26÷2.30]. Szczególnie dużo uwagi poświęca się ulepszaniu cieplnemu przedmiotów z tworzyw poliamidowych.

Ulepszanie cieplne przeprowadza się po zakończeniu skurczu pierwotnego lub gdy skurcz ten osiągnął co najmniej 83÷85% wartości [2.35, 2.43], a w przypadku przedmiotów wilgotnych — po ich suszeniu. Podstawowymi wielkościami charakteryzującymi przebieg procesu ulepszania cieplnego są: temperatura, czas i właściwości ośrodka. Temperatura ulepszania t_u jest, w przypadku tworzyw termoplastycznych, funkcją temperatury topnienia t_t

$$t_u = \psi t_t \tag{2.8}$$

a w przypadku tworzyw utwardzalnych funkcją temperatury przetwórstwa t_p

$$t_u = \psi t_p \tag{2.9}$$

Dla tworzyw bezpostaciowych $\psi = 0{,}55 \div 0{,}6$, dla tworzyw częściowo krystalicznych $\psi = 1{,}15 \div 1{,}2$. Czas ulepszania jest determinowany szybkością nagrzewania i ochładzania przedmiotu oraz czasem przetrzymywania go w temperaturze ulepszania. Szybkość nagrzewania i ochładzania jest różna i zależy głównie od współczynnika przewodzenia ciepła w układzie przedmiot–ośrodek i od grubości ścianek przedmiotu. Szybkość ta na ogół jest rzędu 0,5÷1,5 K/min, ale może być mniejsza, nawet wynosić 0,12 K/min, oraz większa i dochodzić do 36 K/min i więcej. Czas przetrzymywania przedmiotu wynosi przeciętnie od kilkunastu do kilkudziesięciu minut, ale może czasami trwać wyjątkowo do 30 dób. Ulepszanie cieplne odbywa się głównie w następujących ośrodkach: powietrze bądź azot o różnej wilgotności, woda, para wodna, oleje. Podczas przebywania tworzywa w ośrodku może zachodzić sorpcja z jej skutkami.

Wielkością charakteryzującą całościowo efekty ulepszania cieplnego jest współczynnik efektywności ulepszania K_u, definiowany jako stosunek określonej właściwości przedmiotu po ulepszaniu P_2 do tej właściwości przed ulepszaniem P_1

$$K_u = \frac{P_2}{P_1} \tag{2.10}$$

W zależności od przebiegu i warunków ulepszania cieplnego, dzieli się je na kilka podstawowych odmian, głównie na:

— *normalizowanie*, którego zasadniczym celem jest zmniejszenie naprężeń własnych — powolne nagrzewanie do właściwej temperatury w odpowiednim ośrodku, przetrzymanie w w tej temperaturze przez określony czas i ochładzanie w powietrzu;

— *wygrzewanie*, którego celem jest nie tylko zmniejszenie naprężeń własnych, ale również polepszenie określonych właściwości, zazwyczaj mechanicznych, odporności na zużywanie tribologiczne i właściwości dielektrycznych — przebiega podobnie jak normalizowanie, lecz ochładzanie następuje razem z ośrodkiem (temperatura wygrzewania tworzyw częściowo krystalicznych powinna odpowiadać temperaturze największej krystalizacji wtórnej);

— *hartowanie*, którego głównym celem jest zmniejszenie stopnia krystaliczności i powiększenie odkształcalności — powolne nagrzewanie do właściwej temperatury w określonym ośrodku, przetrzymanie w tej temperaturze przez określony czas i szybkie ochładzanie w takim samym ośrodku, a nawet przy użyciu czynnika kriogenicznego, np. ciekłego azotu (130÷180 K).

Poza tym rozróżnia się złożone rodzaje ulepszania cieplnego, przede wszystkim:

— *ulepszanie cykliczne:* odznacza się tym, że dany proces powtarza się cyklicznie 2÷3 razy — ulepszanie to stosuje się najczęściej do polepszenia stabilności wymiarów, kształtu i położenia oraz zmniejszenia anomalii przedmiotów;

— *ulepszanie mieszane:* polega na połączeniu dwóch procesów podstawowych, np. normalizowania i wygrzewania — okazało się, że w ten sposób można znacznie polepszać odporność na zużywanie tribologiczne;

— *ulepszanie cieplno-ciśnieniowe:* polega na przeprowadzaniu wygrzewania pod ciśnieniem dochodzącym nawet do 10 MPa [2.67] — łączy ono efekty ulepszania cieplnego i obróbki nagniataniem.

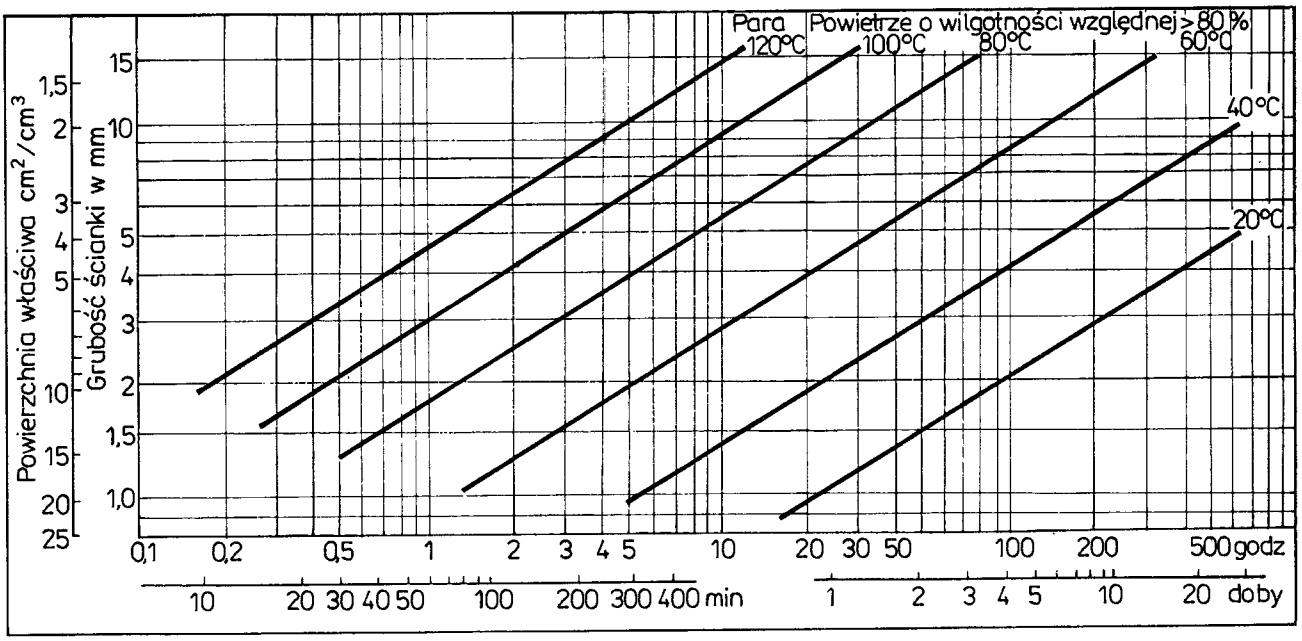
Tablica 2.4

Wpływ ulepszania cieplnego — wygrzewania wyprasek na wybrane właściwości tworzyw poliamidowych i politrioksanu [2.26]

Wskaźnik	Rodzaj tworzywa			
	PA 6 (Tarnamid B)	PA 6 (Tarnamid T-27)	PA 6 (Itamid 353)	POT (Tarnoform 300)
Średni stopień krystaliczności				
Przed ulepszaniem, %	70,3	54,4	59,2	69,5
Po ulepszaniu, %	76,8	83,6	64,5	75,4
Współczynnik K_u	1,09	1,17	1,09	1,08
Przyrost, %	9,2	16,9	9,0	8,6
Wytrzymałość na rozciąganie				
Przed ulepszaniem, MPa	76,7	70,5	121,3	49,6
Po ulepszaniu, MPa	82,0	87,6	144,1	54,9
Współczynnik K_u	1,07	1,24	1,19	1,11
Przyrost, %	6,9	24,2	18,8	10,6
Udarność z karbem według Charpy'ego				
Przed ulepszaniem, kJ/m^2	5,8	7,3	10,3	7,5
Po ulepszaniu, kJ/m^2	3,7	5,4	8,9	6,1
Współczynnik K_u	0,64	0,74	0,86	0,81
Przyrost, %	−36,0	−26,0	−13,6	−18,6

Uwaga: Ulepszanie przeprowadzano w oleju turbinowym, szybkość nagrzewania 0,9 K/min, szybkość ochładzania 0,6 K/min, temperatura oleju dla tworzyw poliamidowych 170°C, a dla politrioksanu 140°C, czas przetrzymywania w oleju 1 h.

Największe znaczenie ma wygrzewanie. Podczas wygrzewania tworzyw termoplastycznych zachodzi wzrost stopnia krystaliczności (tabl. 2.4), na ogół zwiększenie wymiarów krystalitów oraz uporządkowanie struktury makrocząsteczek [2.25] i, co jest z tym związane, wzrost wytrzymałości na rozciąganie (tabl. 2.4), zmniejszenie udarności (tabl. 2.4), odkształcalności oraz często współczynnika tarcia [2.24], wzrost wytrzymałości na zginanie i twardości, wytrzymałości zmęczeniowej [2.22, 2.48, 2.49], jak również zazwyczaj powiększanie się współczynników sprężystości. Na rysunku 2.43 przedstawiono zależności pomiędzy wielkościami charakteryzującymi proces



Rys. 2.43. Zależności pomiędzy wielkościami charakteryzującymi proces wygrzewania przedmiotów z PA 6.6 z zawartością 30% krótkiego włókna szklanego (Ultramid A3WG6) do żądanej wilgotności 1,5% (BASF, Niemcy)

wygrzewania, na przykładzie przedmiotów z PA 6.6 z zawartością 30% krótkiego włókna szklanego, pozwalające na dobór zalecanych parametrów wygrzewania. Zjawiska zachodzące podczas wygrzewania tworzyw utwardzalnych są stosunkowo mniej poznane. Na ogół obserwuje się wzrost wytrzymałości, np. na zginanie, i nieznaczny wzrost udarności (tabl. 2.5), przy czym w przypadku wytrzymałości na zginanie lepsze rezultaty otrzymuje się w wyższej temperaturze i w ośrodku o większym współczynniku przewodzenia ciepła i większym cieple właściwym (rys. 2.44). Wygrzewanie tych tworzyw powiększa ich odporność na zużywanie tribologiczne oraz powoduje stabilizację procesu tarcia (rys. 2.45).

Ulepszanie cieplne przeprowadza się w komorach lub tunelach ogrzewanych, albo lepiej klimatyzowanych, bądź w urządzeniach specjalnych, muszą one jednak zapewniać regulowany przyrost temperatury w czasie.

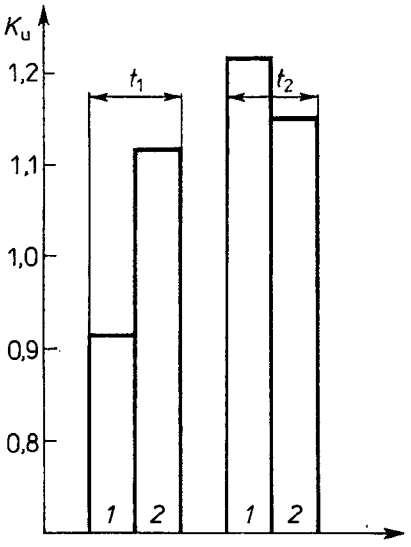
Pewną specyfikę wykazuje ulepszanie cieplne folii. Przeprowadza się je tylko w niektórych przypadkach w celu zmniejszenia naprężeń własnych i powiększenia

Tablica 2.5

Wpływ ulepszania cieplnego — wygrzewania wyprasek na wybrane właściwości tworzywa fenolowego Polofen FE-18-1 [2.35]

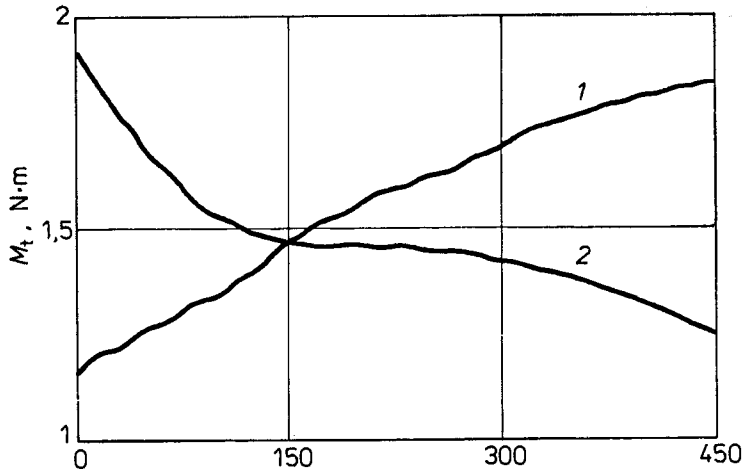
Wskaźnik	Temperatura oleju silnikowego, °C		
	155	170	185
Wytrzymałość na zginanie			
Przed ulepszaniem, MPa	86,5	86,5	86,5
Po ulepszaniu, MPa	89,1	96,9	97,5
Współczynnik K_u	1,03	1,12	1,13
Przyrost, %	3,0	12,0	12,7
Udarność bez karbu			
Przed ulepszaniem, kJ/m^2	4,3	4,3	4,3
Po ulepszaniu, kJ/m^2	4,3	4,6	4,4
Współczynnik K_u	1,0	1,07	1,02
Przyrost, %	0	7,0	2,3

Uwaga: Ulepszanie przeprowadzano w oleju silnikowym, szybkość nagrzewania 1 K/min, szybkość ochładzania 0,5 K/min, czas przetrzymywania w oleju 1 h, oznaczanie wytrzymałości na zginanie i udarności bez karbu metodą Dynstat.



Rys. 2.44. Wpływ temperatury wygrzewania wyprasek z tworzywa fenolowego Polofen F-1 na współczynnik K_u efektywności wygrzewania w przypadku wytrzymałości na zginanie (*1*) i udarności bez karbu (*2*): t_1 — 155°C, t_2 — 170°C; pozostałe warunki jak w tabl. 2.5 [2.35]

wydłużenia przy rozciąganiu. Ulepszanie to polega na szybkim i krótkotrwałym nagrzaniu folii bez naprężenia do temperatury przekraczającej temperaturę przetwórstwa i jej szybkim ochłodzeniu. W przypadku folii kalandrowanej PVC ulepszanie wykonuje się poprzez przeprowadzenie folii przez układ walców, z których jeden jest nagrzany do temperatury 290°C [2.13], usytuowany w linii technologicznej kalandrowania pomiędzy kalandrem a urządzeniem chłodzącym.

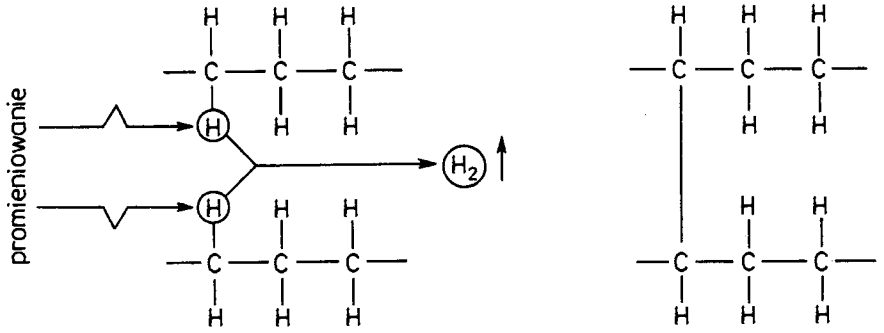


Rys. 2.45. Wartości chwilowego momentu tarcia M_t w zależności od liczby obrotów v w przypadku próbek — wyprasek z fenolowego laminatu bawełnianego, otrzymane z maszyny Amsler przy współpracy z przeciwpróbką stalową: *1* — tworzywo bez wygrzewania, *2* — tworzywo wygrzewane w temperaturze 150°C w czasie 24 h w powietrzu [2.3]

2.5.2. Ulepszanie radiacyjne

Pod pojęciem ulepszania radiacyjnego rozumie się poddawanie przedmiotów z tworzywa działaniu promieniowania jonizującego, przede wszystkim promieniowania elektronowego, promieniowania gamma i nadfioletowego. Największe znaczenie ma dotychczas ulepszanie radiacyjne przedmiotów, zwłaszcza cienkościennych, z polietylenu, mniejsze z polichlorku winylu, poliamidu, polioctanu winylu i polistyrenu.

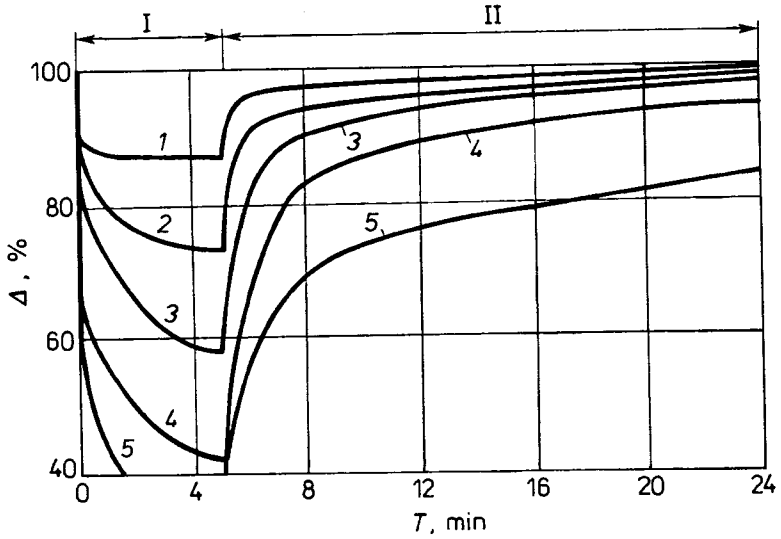
Pod wpływem promieniowania jonizującego oddziałującego na PE następuje wybicie niektórych atomów wodoru z łańcucha głównego, który pęka. W rezultacie powstają wiązania nienasycone, a te z kolei powodują wytworzenie wiązań poprzecznych, czyli sieciowanie*. Modelowo można to przedstawić następująco:



(2.11)

* Sieciowanie polietylenu może przebiegać również pod wpływem innych czynników, np. związków chemicznych [2.53].

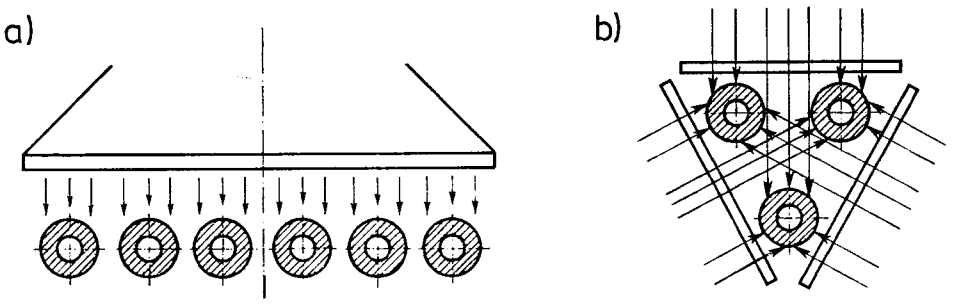
W napromienianym PE powstają produkty gazowe, których głównym składnikiem jest wodór [wzór (2.11)] oraz nieznaczne ilości zarówno nasyconych, jak i nienasyconych węglowodorów. Powstają także rodniki alkilowe oraz allilowe, a po pochłonięciu bardzo dużych dawek — polienylowe. Do charakterystycznych właściwości napromienianego PE należy wzrost odporności cieplnej do temperatury 135°C i wyższej [2.16] oraz pamięć kształtu, określana zakresem, siłą i czasem powrotu poodkształceniowego w danych warunkach cieplnych (rys. 2.46). Odkształcenie plastyczne próbek napromienionych dawką większą od 120 kGy zwykle nie przekracza 2÷3%, zatem pamięć kształtu w tych przypadkach jest niemal całkowita, nawet w temperaturze 150°C. PE o takich właściwościach odznacza się zawartością fazy usieciowanej 50÷60% [2.70].



Rys. 2.46. Zależność wysokości Δ próbki z PE od czasu T dla różnych dawek promieniowania elektronowego: *1* — 213 kGy, *2* — 142 kGy, *3* — 105 kGy, *4* — 72 kGy, *5* — 35 kGy; I — ściskanie siłą 5 N, II — swobodny powrót poodkształceniowy, temperatura 150°C [2.70]

Do ulepszania radiacyjnego PE stosuje się powszechnie liniowe akceleratory o energii elektronów do 14 MeV i mocy wiązki 6 kW, umożliwiające napromienianie kształtowników w sposób ciągły bezpośrednio pod akceleratorem lub wyposażone w przenośnik taśmowy umożliwiający napromienianie przedmiotów bryłowych w pojemnikach, poruszających się z tym przenośnikiem. Wyprowadzenie wiązki elektronów powinno być takie, aby zapewnić w miarę jednakowy stopień usieciowania PE. Na rysunku 2.47 przedstawiono podstawowe możliwości wyprowadzania wiązki elektronów na rury z PE: jednokierunkowe z tubusa płaskiego i trójkierunkowe z tubusa trójkątnego. Ze względu na odbicie i rozproszenie promieniowania na powierzchni przedmiotów napromienianych, dawka promieniowania nie jest jednakowa w całym zakresie grubości ścianki. W związku z tym używa się pojęcia *zasięgu użytecznego elektronów*, który odnosi się do grubości tworzywa, na której stopień usieciowania jest nie mniejszy niż 30% wartości największej.

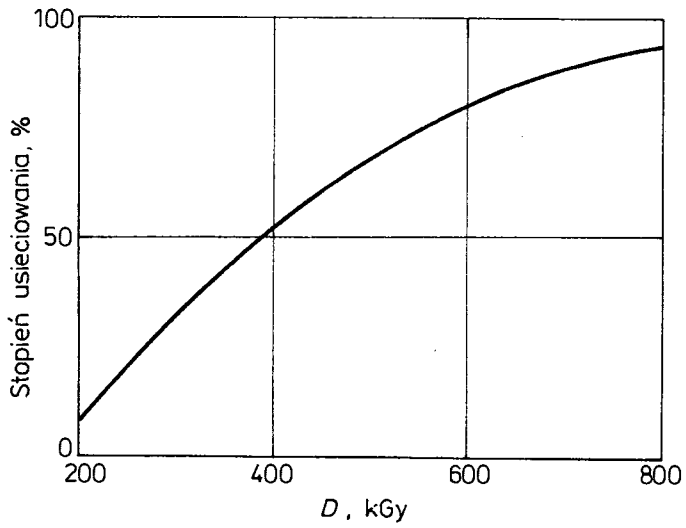
W zastosowaniach ulepszanego radiacyjnie PE wykorzystuje się jego specyficzne właściwości, a więc stosuje się go do przedmiotów użytkowanych trwale w temperaturze do 135°C, kurczących się pod wpływem ciepła — termokurczliwych, np. do rur, wstęg, węży i folii.



Rys. 2.47. Podstawowe możliwości wyprowadzania wiązki elektronów na rury: a) jednokierunkowe z tubusa płaskiego, b) trójkierunkowe z tubusa trójkątnego

W przypadku ulepszania radiacyjnego PVC dawki promieniowania potrzebne do uzyskania dużego stopnia usieciowania muszą być stosunkowo duże, co z ekonomicznego punktu widzenia bywa bezzasadne [2.10]. Ze wzrostem dawki pochłoniętej, powiększa się zawartość fazy usieciowanej (rys. 2.48), ale przebieg zależności zależy od składu chemicznego PVC. Przyjmuje się, że przy ulepszaniu promieniowaniem elektronowym wymagana dawka promieniowania wynosi na ogół co najmniej 300 kGy. Z tego powodu stosuje się ulepszanie radiacyjno-chemiczne, polegające na napromienianiu PVC głównie promieniowaniem elektronowym, gamma i rzadziej nadfioletowym, z jednoczesnym zastosowaniem aktywatorów chemicznych. Zmniejsza to istotnie wymaganą dawkę promieniowania, np. przy ulepszaniu promieniowaniem elektronowym do 50 kGy, a przy ulepszaniu promieniowaniem gamma do 10 kGy i mniej. Jako aktywatory stosuje się przy ulepszaniu promieniowaniem elektronowym tiole (np. fenylotiol), nienasycone poliestry, cyjanurany trialkilowe, metakrylan metylu i alkohol allilowy, natomiast przy ulepszaniu promieniowaniem gamma — różne reaktywne monomery, np. cyjanuran triallilowy, dimetakrylan glikolu etylenowego lub triakrylan trihydroksymetylopropanu.

Ulepszony radiacyjnie PVC odznacza się przede wszystkim zwiększoną odpornością cieplną i wytrzymałością mechaniczną, np. w przypadku ulepszania promieniowaniem



Rys. 2.48. Zależność stopnia usieciowania PVC od dawki D promieniowania gamma (skład: polimer PVC — 100, ftalan dioktylowy — 45, stearynian ołowiu — 2) [2.10]

gamma odporność cieplna może wzrosnąć nawet czterokrotnie, a wytrzymałość mechaniczna trzykrotnie.

Pod wpływem promieniowania jonizującego zmiany zachodzące w tworzywie mogą być jednak tak duże, że powodują rozkład tworzywa, i wówczas ma się do czynienia z *degradacją radiacyjną*. Zależy to od rodzaju tworzywa i pochłoniętej przez nie dawki promieniowania. Degradacja radiacyjna jest wykorzystywana jako jedna z metod utylizacji odpadów tworzyw [2.71].

2.5.3. Aktywowanie

Niektóre przedmioty z tworzyw są poddawane procesom klejenia, laminowania, drukowania, metalizowania i nanoszenia warstw światłoczułych, kreślarskich itp. We wszystkich tych przypadkach jest potrzebna odpowiednio duża adhezja kleju, farby, metalu itd. do powierzchni przedmiotów. Adhezję tę determinuje, w odniesieniu do danego tworzywa, stan energetyczny warstwy wierzchniej przedmiotu, charakteryzowany przez napięcie powierzchniowe i energię powierzchniową. Napięcie powierzchniowe jest zwykle małe i należy je zwiększyć, co dotyczy zwłaszcza tworzyw polarnych. Na przykład w przypadku folii polietylenowej przeznaczonej do drukowania fleksograficznego farbami z rozpuszczalnikami alkoholowymi, mającymi napięcie powierzchniowe $20 \div 25$ mN/m, napięcie powierzchniowe folii w chwili drukowania powinno wynosić co najmniej 35 mN/m [2.88]. Procesy prowadzące do zwiększania adhezji noszą wspólną nazwę *aktywowania warstwy wierzchniej*.

Ogólnie biorąc, podczas aktywowania warstwy wierzchniej zachodzą w niej następujące zmiany:

— usuwanie zewnętrznych powłok strefy przypowierzchniowej, mających charakter zanieczyszczeń pochodzących od procesu przetwórstwa,

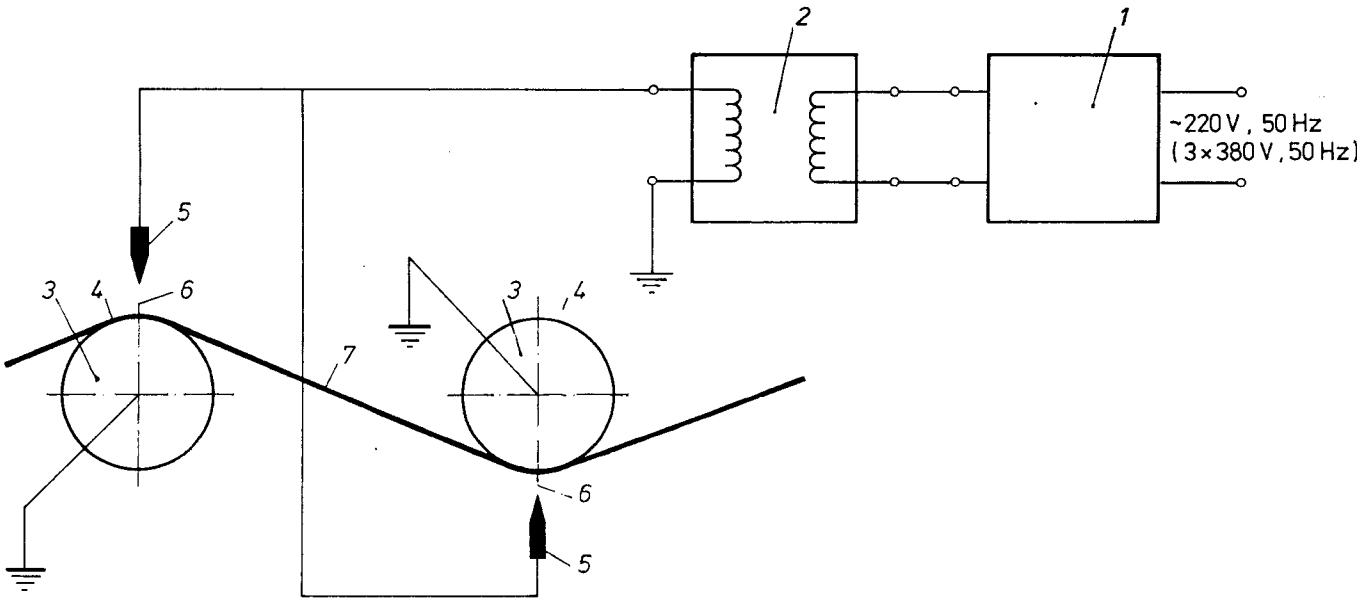
— deformacje struktury geometrycznej powierzchni, w tym wzrost jej chropowatości,

— reakcje chemiczne prowadzące do powstawania związków polarnych.

Aktywowanie warstwy wierzchniej można wykonywać za pomocą działania na nią różnymi czynnikami [2.23, 2.69, 2.75], ale największe znaczenie ma działanie wyładowaniami elektrycznymi niezupełnymi (koronowymi), płomieniem — opłomienianie, wyładowaniami jarzeniowymi, promieniami nadfioletowymi i laserem.

Aktywowanie wyładowaniami niezupełnymi

Aktywowanie warstwy wierzchniej za pomocą wyładowań niezupełnych (koronowych) ma szczególnie duże znaczenie i w związku z tym poświęci mu się więcej uwagi. Odbywać się ono może w powietrzu, co jest najczęstsze i ma największe znaczenie, jak również w atmosferze tlenu, azotu, argonu, helu i dwutlenku węgla. Spośród dość licznych publikacji przedstawiających to aktywowanie wyróżnić należy obszerne i oryginalne prace M. Żenkiewicza [2.85 ÷ 2.89]. Na rysunku 2.49 pokazano schemat procesu dwustronnego, ciągłego aktywowania w powietrzu, na przykładzie folii. Pod wpływem różnicy potencjałów występujących pomiędzy elektrodami w szczelinie międzyelektrodowej następuje jonizacja powietrza i powstaje plazma niskotem-

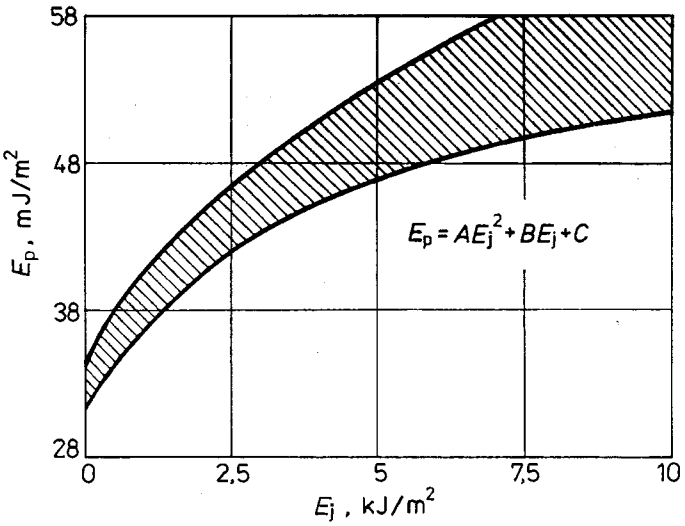


Rys. 2.49. Schemat procesu aktywowania dwustronnego, ciągłego folii: *1* — generator (0,5÷10 kW), *2* — transformator wysokiego napięcia (10÷20 kV), *3* — wałki (elektrody uziemione), *4* — izolacje elektrod uziemionych, *5* — elektrody wysokiego napięcia, *6* — szczeliny powietrza (międzyelektrodowe) 2÷4 mm, *7* — folia aktywowana (15÷300 μm)

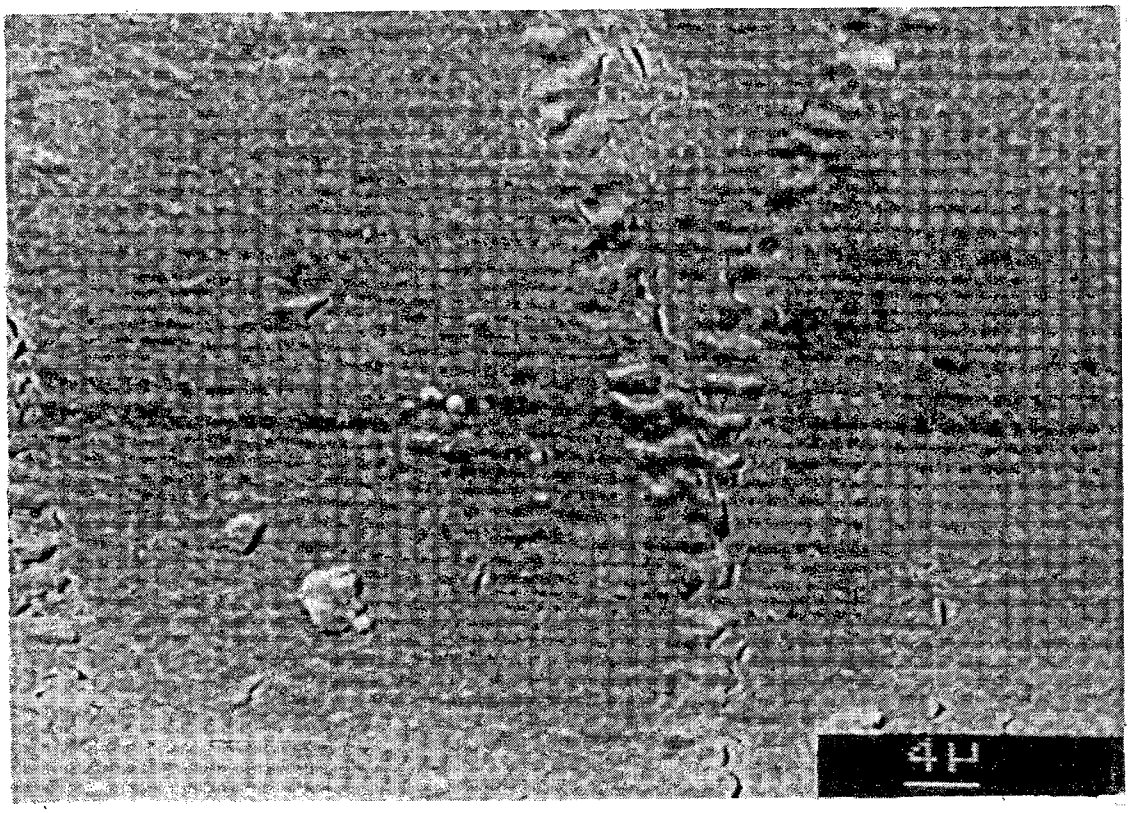
peraturowa [2.79]. Cząstki plazmy poruszające się między elektrodami mają różną energię kinetyczną. Strumień plazmy padając na powierzchnię tworzywa powoduje częściowe usuwanie powłok strefy przypowierzchniowej oraz zmiany struktury geometrycznej powierzchni. Ze wszystkich cząstek znajdujących się w strumieniu plazmy, największą energię kinetyczną uzyskują elektrony — większość elektronów padając na powierzchnię tworzywa ma średnią energię kinetyczną wynoszącą około 10 eV. Elektrony te uderzając w makrocząsteczki powodują rozrywanie ich wiązań chemicznych. Rozrywanie wiązań jest powodowane również przez inne cząstki o energii kinetycznej większej od energii wiązań pomiędzy poszczególnymi atomami w makrocząsteczkach. Pękaniu wiązań towarzyszy powstawanie przejściowych rodników, które, reagując głównie z tlenem, ozonem, cząsteczkami H_2O, grupami —OH i ze sobą, tworzą związki polarne. Związki te zawierają m. in. grupy:

$>C=O$ (karbonylowe), $-C\overset{O}{\underset{H}{<}}$ (aldehydowe), —OH (hydroksylowe) i $-C\overset{O}{\underset{OH}{<}}$ (karboksylowe), wchodzące w skład ketonów, aldehydów, alkoholi i kwasów organicznych. Jednocześnie następuje degradacja utleniająca tworzywa. Powstające w warstwie wierzchniej tworzywa związki polarne powodują wzrost swobodnej energii powierzchniowej E_p. Może również zachodzić, ale na ogół w małym zakresie, sieciowanie. Następstwem tego wszystkiego jest powiększanie adhezji.

Podstawowymi parametrami procesu aktywowania są: energia odniesiona do jednostki powierzchni tworzywa aktywowanego, przeniesiona przez strumień plazmy, zwana *energią jednostkową* E_j, prędkość ruchu tworzywa prostopadle do strumienia plazmy, zwana *szybkością aktywowania*, częstotliwość prądu zasilającego elektrodę wysokiego napięcia i szerokość szczeliny międzyelektrodowej. W miarę powiększania się energii jednostkowej E_j wzrasta energia powierzchniowa E_p z różną intensywnością,



Rys. 2.50. Zależność energii powierzchniowej E_p folii PE-LD o grubości 180 μm od energii jednostkowej E_j strumienia plazmy przenoszonej na powierzchnię folii w przypadku folii bez zawartości środka smarującego (krzywa dolna) i ze wzrastającą ilością amidu kwasu oleinowego $\left(R—C(=O)—NH_2\right)$ do 0,2% (krzywa górna) [2.87]

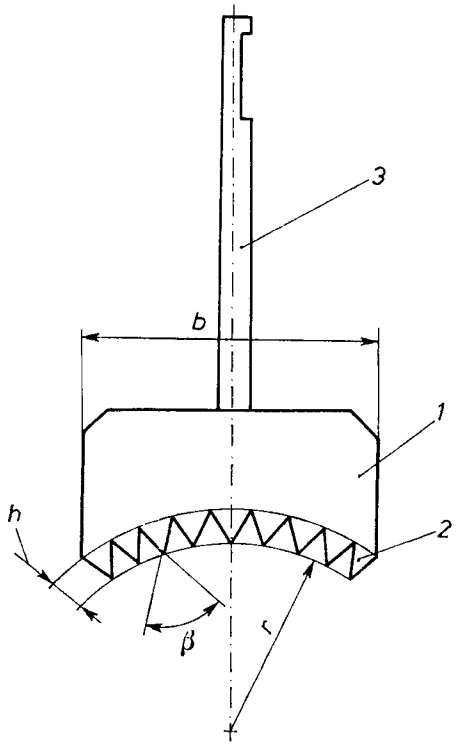


Rys. 2.51. Wygląd powierzchni folii PE-LD o grubości 180 μm z zawartością 0,2% amidu kwasu oleinowego po procesie aktywowania przy $E_j = 50$ kJ/m^2, a więc znacznie przekraczającej wartości stosowane w praktyce [2.87]

np. zależną od zawartości w tworzywie środków smarujących (rys. 2.50). Dobór tych parametrów powoduje, że czas procesu aktywowania jest bardzo krótki i wynosi $0{,}002 \div 0{,}3$ s, a głębokość zmian warstwy wierzchniej zazwyczaj zawiera się granicach $5 \div 15$ nm [2.89]. Na rysunku 2.51 jest pokazany wygląd powierzchni folii PE-LD

z widocznymi śladami po wyładowaniach o największej wysokości nierówności nieco mniejszej niż 2 μm.

Głównym elementem maszyn do aktywowania, zwanych *aktywatorami elektrycznymi*, są elektrody wysokiego napięcia. Znane są elektrody w kształcie pręta kołowego, prostokątnego lub trójkątnego oraz elektrody kształtowe [2.55, 2.60, 2.85]. Jedno z rozwiązań elektrod kształtowych jest pokazane na rys. 2.52.



Rys. 2.52. Kształtowa elektroda wysokiego napięcia: *1* — korpus, *2* — zęby trójkątne, *3* — ramię (uchwyt elektrody), *b* — szerokość korpusu, *r* — promień elektrody, *h* — wysokość zębów, np. 3 mm, β — kąt wierzchołkowy zębów, np. $(\pi/4)$ rad [2.59]

Energię jednostkową E_j można wyznaczyć ze wzoru

$$E_j = k_a \frac{\dot{N}}{v\, l} \tag{2.12}$$

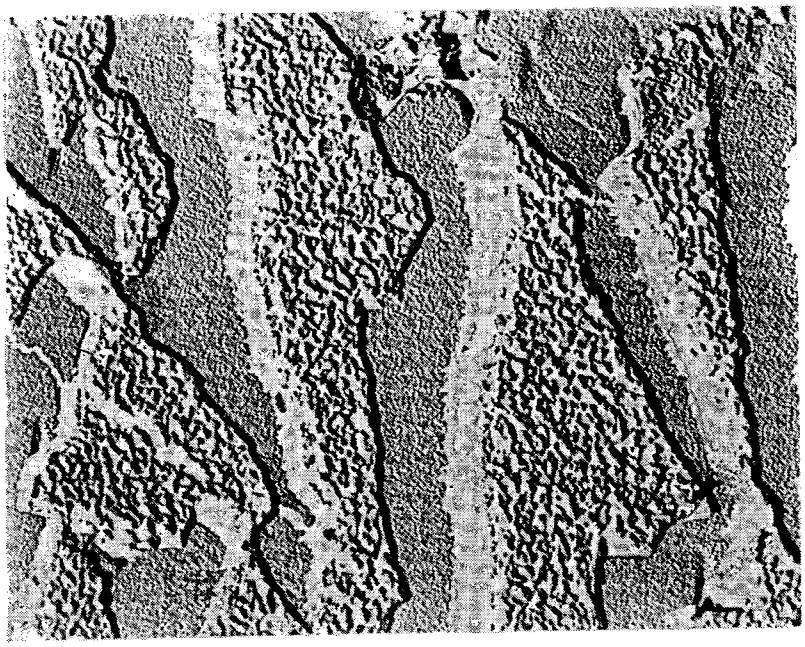
w którym $\dot{N}$ oznacza moc elektryczną wyładowań niezupełnych, natomiast l — długość elektrody. Współczynnik k_a ($k_a \leqslant 1$) efektywności procesu aktywowania zależy przede wszystkim od kształtu elektrody, jej szerokości i szybkości aktywowania. W przypadku elektrod prętowych o stałej szerokości, duża szybkość aktywowania powoduje odchylanie strumienia plazmy w kierunku ruchu, co osłabia jej oddziaływanie i wówczas $k_a < 1$. Zwiększanie szybkości aktywowania, bezpośrednio wpływające na wydajność, pociąga za sobą konieczność poszerzania elektrod.

Korzystniejsze rezultaty uzyskuje się, gdy warstwa wierzchnia podczas procesu aktywowania ma wyższą temperaturę. Nagrzewanie przedmiotów przed aktywowaniem często przeprowadza się pojemnościowo [2.54, 2.87]. Ale proces aktywowania można prowadzić również bezpośrednio po podstawowym procesie przetwórstwa, gdy przedmiot jeszcze się nie ochłodził, np. bezpośrednio po wytłaczaniu z rozdmuchiwaniem od wewnątrz folii rurowej [2.57]. W takich przypadkach aktywator elektryczny stanowi część stanowiska bądź linii technologicznej wytwarzania przedmiotów.

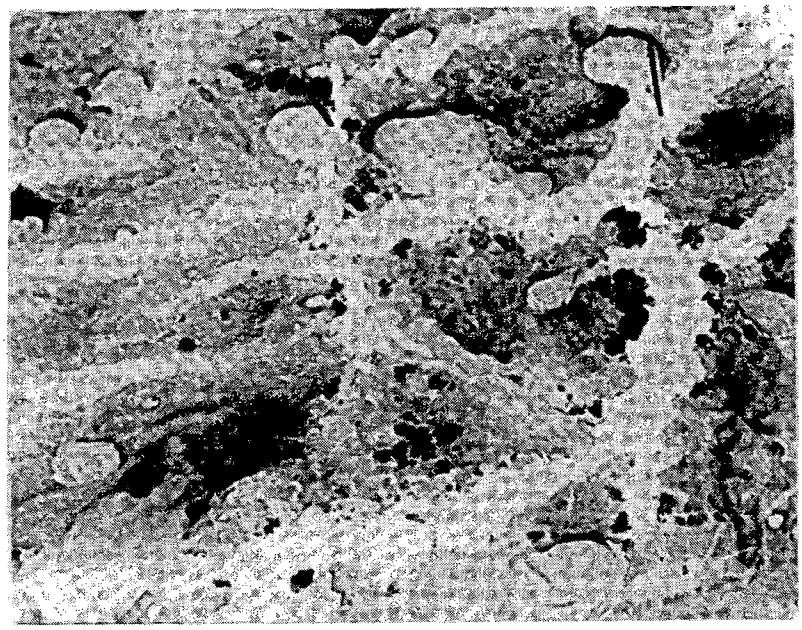
Aktywowanie płomieniem — opłomienianie

Aktywowanie to polega na krótkotrwałym działaniu na powierzchnię płomienia gazowego. Czas działania płomienia jest krótszy niż 1 sekunda [2.58]. Stosuje się je zwłaszcza do wytworów mających grube ścianki. Na przykład aktywowanie płomieniem warstwy wierzchniej zderzaków z PP przed malowaniem powoduje wzrost napięcia powierzchniowego z 29 mN/m do 46÷50 mN/m, ale jest możliwy wzrost nawet do 73 mN/m [2.12]. Efekt zwiększonego napięcia powierzchniowego zanika samoistnie zwykle po 48÷72 godzinach. Opłomienianie wykonuje się często w cyklu automatycznym, np. w rozwiązaniu firmy Esseci (Włochy) stosuje się roboty z 4 wymiennymi palnikami o różnych rozmiarach płomienia.

a)



b)



Rys. 2.53. Wygląd powierzchni utwardzonej żywicy fenolowo-formaldehydowej przed (a) oraz po (b) działaniu promieniowania nadfioletowego przez 6 h z lampy kwarcowej [2.64]

Aktywowanie wyładowaniami jarzeniowymi

Wyładowania jarzeniowe (emisja jonów i elektronów) prowadzące do aktywowania warstwy wierzchniej odbywają się w atmosferze tlenu, azotu, argonu, helu, neonu, amoniaku, dwutlenku węgla i związków fluoru pod ciśnieniem $100 \div 150$ Pa [2.61]. Aktywowanie to stosuje się przede wszystkim przed procesem metalizowania próżniowego, jako integralnie z nim związane i powodujące również nagrzewanie przedmiotu [2.80].

Aktywowanie promieniami nadfioletowymi

Do tego aktywowania warstwy wierzchniej stosuje się promieniowanie nadfioletowe, najczęściej o długości fali $80 \div 320$ nm, na ogół w atmosferze powietrza, rzadziej wzbogaconego w tlen [2.37]. Źródłem promieniowania są na ogół lampy kwarcowe, np. o mocy 700 W. Na rysunku 2.53 pokazano wygląd powierzchni utwardzonej żywicy fenolowo-formaldehydowej przed działaniem promieniowania nadfioletowego i po nim.

Aktywowanie laserem

Aktywowanie za pomocą lasera należy do nowszych, jeszcze nie sygnalizowanych w znaczących publikacjach [2.52, 2.69, 2.75, 2.87]. Do aktywowania stosuje się laser molekularny CO_2 [2.17], którego promieniowanie jest szybko przemieszczane po powierzchni tworzywa. Aktywator laserowy firmy General Motors (USA) jest wyposażony w laser CO_2 o szerokości wiązki 3 mm, przemieszczającej się z prędkością 0,5 m/s.

Literatura

2.1. Bandrowski J. i inni: Suszenie polimerów w złożu fluidalnym. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 4/1990.
2.2. Boryniec A., Skwarski T.: „Technologia włókien sztucznych". WPLiS, Warszawa 1969.
2.3. Broś J.: Wpływ obróbki cieplnej na ścieralność wzmocnionych tworzyw fenolowych jako materiałów łożyskowych. *Polimery* 5/1969.
2.4. Ceglińska J., Michalski K.: Metody zgrzewania elementów z termoplastycznych tworzyw sztucznych. *Mechanik* 2/1980.
2.5. Ciesielska D.: Obserwacje i analiza geometrycznych zmian spiekanych cząstek polimerowych na przykładzie polistyrenu. *Polimery* 3/1990.
2.6. Ciesielska D., Kelar K., Bratborska E.: Technologia spiekania elementów z tworzyw termoplastycznych. *Przegląd Mechaniczny* 22/1987.
2.7. Colditz W.: Spajanie tworzyw sztucznych. *Przegląd Spawalnictwa* 10/1984.
2.8. Czerniawski B., Nassalski A.: „Folie opakowaniowe". WNT, Warszawa 1970.
2.9. Dobrosz K.: „Spawacz tworzyw sztucznych". Wydawnictwo Akcydensowe, Warszawa 1980.
2.10. Duchacek V.: Reakcje sieciowania polichlorku winylu. *Polimery* 11/1988.
2.11. Elektromagnetisches Schweissen von Kunststoffen. *Kunststoffe* 7/1987.
2.12. Flamed bumpers. *Macplas International* 10/1987.
2.13. „Folie z polichlorku winylu" (praca zbiorowa pod red. Z. Roszkowskiego). WNT, Warszawa 1969.
2.14. Habenicht G., Ritter J.: Ultraschallschweissen von Thermoplasten. *Kunststoffe* 9/1989.

2.15. Hałasa E., Heneczkowski M., Potopianek Z.: Wpływ wilgoci na właściwości termoplastycznych elastomerów uretanowych w stanie stopionym. *Polimery* 10/1987.
2.16. Heropolitański A., Stachowiak R.: Sieciowanie radiacyjne rur termokurczliwych. *Przegląd Mechaniczny* 10/1983.
2.17. High-speed lasers clean SMC surfaces, make adhesive bonding of parts more practical. *Modern Plastics International* 1/1990.
2.18. Irzyk M.: „Nowoczesne metody przetwórstwa tworzyw sztucznych". PWT, Warszawa 1961.
2.19. Jarmulski T.: Badanie zgrzewania czołowego rur z polibutenu z punktu widzenia możliwości zastosowania ich do budowy instalacji przemysłowych. *Polimery* 10/1975.
2.20. John P., Hessel J., Gaube E.: Eine Neuentwicklung auf dem Gebiet des Extrusionsschweissens. *Kunststoffe* 1/1985.
2.21. Kelar K., Ciesielska D., Bratborska E.: Porowate spieki z tworzyw termoplastycznych. *Polimery* 5/1986.
2.22. Kilian T.: Wpływ obróbki cieplnej na parametry wytrzymałościowe rur z PWC. *Polimery* 7/1978.
2.23. Klein H.: Vorbehandlung der Substratoberflächen in Verbindung mit beschichtungs- und kaschiertechnologischen Problemstellungen. *Coating* 12/1986.
2.24. Kosicki J.: Trybologiczne aspekty obróbki cieplnej poliamidu 6. *Przegląd Mechaniczny* 11/1980.
2.25. Kosińska W., Grzelak D., Szepke-Wróbel A.: Wpływ obróbki termicznej na strukturę krystaliczną polipropylenu J 400. *Polimery* 5/1982.
2.26. Koszkul J.: Obróbka cieplna poliamidu 6 i politrioksanu. *Polimery* 6/1983.
2.27. Koszkul J.: Wpływ obróbki cieplnej na strukturę oraz wybrane właściwości fizyczne poliamidu 6 i politrioksanu. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, mechanika nr 21. Częstochowa 1985.
2.28. Koszkul J.: Wpływ obróbki cieplnej na właściwości tworzyw termoplastycznych. *Przegląd Mechaniczny* 5 i 6/1984.
2.29. Koszkul J.: Wpływ temperatury na skład fazowy poliamidu 6 i politrioksanu. *Polimery* 7–8/1988.
2.30. Koszkul J.: Wpływ wyżarzania na udział faz krystalicznych i strukturę poliamidu 6 oraz politrioksanu. *Archiwum Nauki o Materiałach* 1–2/1989.
2.31. Kowalewski M., Wachowicz S.: Konstrukcja złączy przy ultradźwiękowym zgrzewaniu tworzyw sztucznych. *Mechanik* 7/1977.
2.32. Kowalewski M., Wachowicz S.: Zgrzewanie ultradźwiękowe — nowy sposób łączenia termoplastów. *Mechanik* 6/1977.
2.33. Kurr F.: Schweissverfahren und Anwendung für thermoplastische Kunststoffe. *Maschinenmarkt* 81/1975.
2.34. Kurzeittrocknung von Kunststoffen. *Kunststoffe-Plastics* 7–8/1983.
2.35. Kuszewski K.: Modyfikacja cieplna właściwości tworzyw utwardzalnych. *Polimery* 7–8/1988.
2.36. Kuzia A., Nassalski A.: „Systemy pakowania w folie kurczliwe". WNT, Warszawa 1978.
2.37. Läuppi V.: Electrocurtain-EPZ-Processors. *Coating* 7/1984.
2.38. Lowry R.D.: „Modern Packaging Encyclopedia". McGraw Hill Inc., New York 1970.
2.39. Macieszek S.: „Syntetyczne tworzywa porowate". WNT, Warszawa 1963.
2.40. Mazurkiewicz S., Rychwalski W.: Doraźna i zmęczeniowa charakterystyka wytrzymałościowa połączeń spawanych z PCW. *Polimery* 2/1978.
2.41. Mikroprozessor-gesteuerte Ultraschall-Schweissgeräte. *Kunststoffe* 1/1985.
2.42. Miller R.L., Winkleman D.R.: Welding plastic with rod: a downstream operation for custom molders. *Plastics Engineering* 4/1980.
2.43. Москатов К.А.: Состояние и перспективы развития термообработки изделий из пластических масс. *Пластические Массы* 2/1979.
2.44. Москатов К.А.: „Термическая обработка пластмассовых и резиновых деталей''. Изд. Машиностроение, Москва 1976.
2.45. Mrowiec M., Urban M.: Problemy suszenia tworzyw sztucznych. *Przemysł Chemiczny* 1/1983.
2.46. Neitzel M. i inni: Reibschweissen von Kunststoffen bei Chemierohren. *Plastverarbeiter* 6/1978.
2.47. Niewiarowski Z.: Zgrzewanie tworzyw sztucznych za pomocą ultradźwięków. *Mechanik* 10–11/1981.

2.48. Nowak M.: „Wytrzymałość tworzyw sztucznych". Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1987.
2.49. Nowak M.: Wytrzymałość zmęczeniowa poliamidu 6 wzmocnionego włóknem szklanym (Itamidu 25). *Polimery* 2/1983.
2.50. Ochnik L.: Łączenie folii termoplastycznych. *Przegląd Spawalnictwa* 12/1984.
2.51. Ochnik L.: Spajanie rur z tworzyw sztucznych. *Przegląd Spawalnictwa* 11/1984.
2.52. Oczoś K.: Ubytkowa obróbka laserowa. *Mechanik* 5 i 7/1989.
2.53. Orłowska I.: Polietylen usieciowany. *Chemik* 9/1989.
2.54. Patent Niemiecki — RFN nr 2 752 052.
2.55. Patent Niemiecki — RFN nr 3 430 210.
2.56. Patent Polski nr 119 664.
2.57. Patent Polski nr 151 059.
2.58. Patent Polski nr 153 100.
2.59. Patent Polski nr 155 114.
2.60. Patent USA nr 3 294 971.
2.61. Perrone L.: If you are bonding more than one, try gas plasma surface treatment. *Plastics Engineering* 5/1980.
2.62. Пийроя Е.К. и др.: Зависимость активируемости поверхности полиэтилена от режима обработки. *Пластические Массы* 3/1974.
2.63. Pik I.Sz.: „Produkcja wyrobów z tworzyw sztucznych". PWT, Warszawa 1956.
2.64. Piotrowska Z.: Obserwacje struktury żywic fenolowo-formaldehydowych w mikroskopie elektronowym. *Polimery* 8/1984.
2.65. Potente H., Michel P., Ruthmann B.: Eine Analyse des Vibrationsschweissens. *Kunststoffe* 7/1987.
2.66. „Handbook of Industrial Drying" (praca zbiorowa pod red. S.A. Mujumdara). Marcel Dekker, New York 1987.
2.67. „Problemy wytężenia i znużenia polimerów jako tworzyw konstrukcyjnych" (praca zbiorowa pod red. J. Zawadzkiego). PWN, Warszawa 1978.
2.68. Przybylski W.: Badania nad cięciem porowatego polistyrenu metodą termoelektryczną. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 112, mechanika z.IX, Gdańsk 1967.
2.69. Rabek J.F.: Fotomodyfikacja powierzchni polimerów. *Polimery* 1/1985.
2.70. Robalewski A., Wojciechowska J.: Radiacyjne modyfikowanie polietylenu. *Polimery* 8–9/1978.
2.71. Rosiak J., Perkowski J., Pękala W.: Radiacyjna utylizacja polimerowych odpadów stałych. *Polimery* 3/1984.
2.72. Schrader W.: „Tworzywa sztuczne — Przeróbka i spawanie". WNT, Warszawa 1973.
2.73. Schrader W., Pannier W.: „Kunststoffhalbzeug-Verarbeitung und Schweissung". VEB Deutscher Verlag Grundstoffindustrie, Leipzig 1983.
2.74. Scherer R.: Vibrationsschweissen — Neuere Konstruktionsmöglichkeiten. *Kunststoff Rundschau* 2/1973.
2.75. Steller R. i inni: Aktywacja powierzchniowa folii polimerowych czynnikami fizycznymi. *Przemysł Chemiczny* 5/1986.
2.76. Strumiłło C.: „Podstawy teorii i techniki suszenia". WNT, Warszawa 1983.
2.77. Surowiak W.: Tworzywa sztuczne jako materiały do izolacji cieplnej. *Energetyka* 6/1970.
2.78. „Сварка полимерных материалов". (poradnik pod red. К.И. Зайцева и Л.Н. Мацюка). Изд. Машиностроение, Москва 1988.
2.79. Urbaniak-Domagała W., Urbańczyk G.: Wpływ oddziaływania plazmą niskotemperaturową na właściwości elektryczne folii politereftalanu etylenu. *Polimery* 6/1988.
2.80. „Uszlachetnianie powierzchni tworzyw sztucznych" (praca zbiorowa pod red. K. Stoeckherta). WNT, Warszawa 1979.
2.81. Волков С.С., Черняк Б.Я.: „Сварка пластмасс ултразвуком". Изд. Химия, Москва 1986.
2.82. Vowinkel H., Röber H.: Schweissen von Kunststoffen. *Kunststoffe* 10/1973.
2.83. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н.: „Сварка пластмасс". Изд. Машиностроение, Москва 1978.

2.85. Żenkiewicz M.: Analiza i badania układów elektrod w aktywatorach folii polimerowych. *Mechanik* 6/1988.
2.86. Żenkiewicz M.: Analyse ausgewählter Effekte der Koronaentladungen in Zusatzstoffe enthaltenden PE-Folien. *Plaste und Kautschuk* 11/1988.
2.87. Żenkiewicz M.: Modyfikacja adhezyjnych właściwości warstwy wierzchniej folii polietylenowej metodą wyładowań niezupełnych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 1052, mechanika z. 98, Gliwice 1990.
2.88. Żenkiewicz M.: Obróbka powierzchniowa folii polietylenowej przed drukowaniem. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 3/1981.
2.89. Żenkiewicz M.: Zmiany warstwy wierzchniej folii polimerowej pod wpływem wyładowań niezupełnych. *Polimery* 1/1989.

Rozdział 3

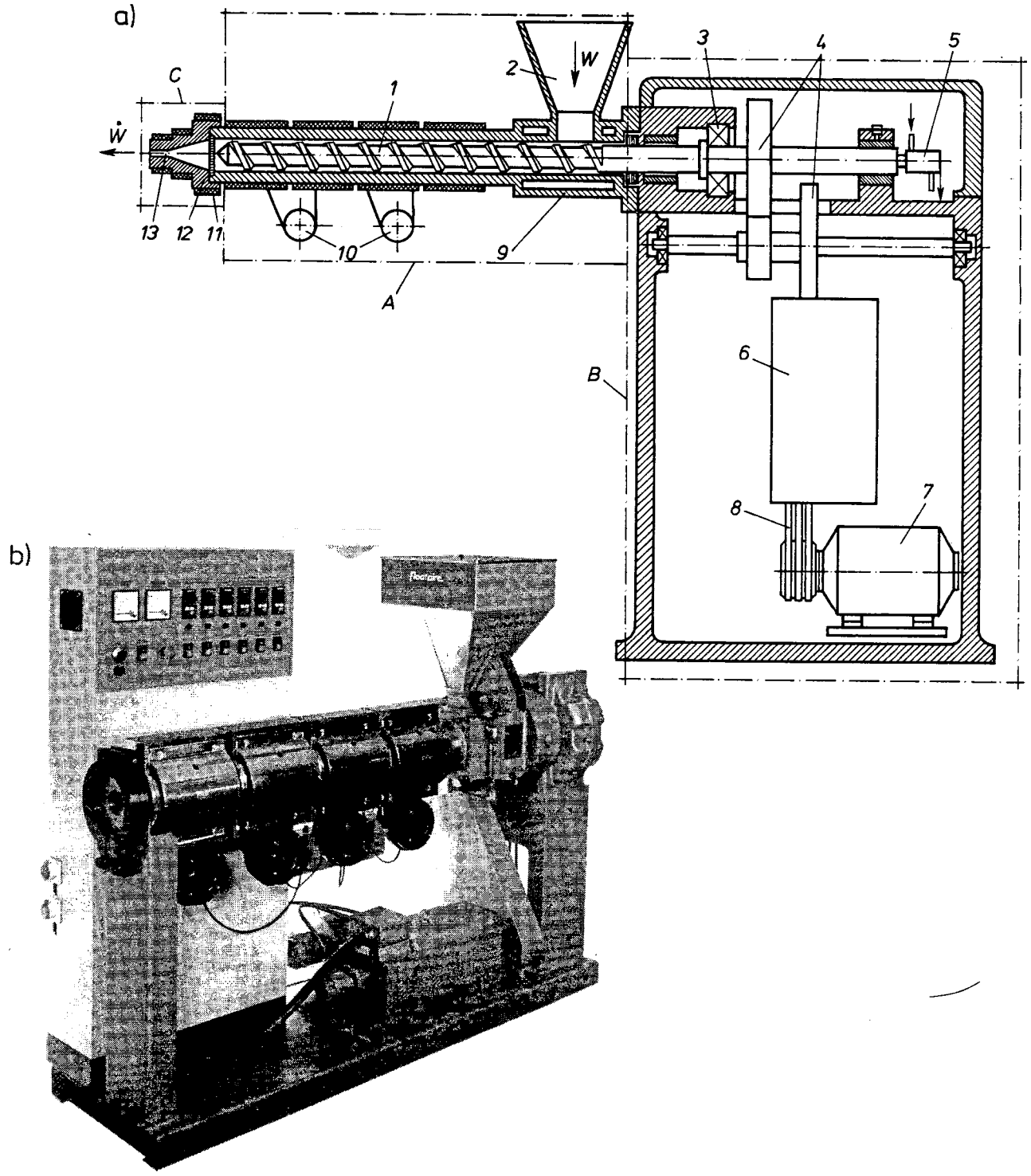
METODY PRZETWÓRSTWA FIZYCZNO-CHEMICZNEGO II RODZAJU

3.1. Wytłaczanie

Wytłaczanie jest metodą przetwórstwa polegającą na ciągłym uplastycznianiu tworzywa w układzie uplastyczniającym i przepychaniu go przez kanały głowicy wytłaczarskiej. Proces wytłaczania przebiega w *wytłaczarkach*, gdzie narzędziem jest *głowica wytłaczarska* zaopatrzona w *dyszę wytłaczarską*, a otrzymany przedmiot nosi nazwę *wytłoczyny*. Wytłaczanie należy do metod przetwórstwa o największym znaczeniu. Wytłaczarka ślimakowa, której istota została opatentowana przez M. Graya już w 1879 r. w Anglii, składa się z dwu głównych układów: układu uplastyczniającego i układu napędowego.

3.1.1. Wytłaczanie konwencjonalne

Na rysunku 3.1 przedstawiono przykładowo wytłaczarkę jednoślimakową do tworzyw termoplastycznych z zamocowanym na niej narzędziem. Ślimak (*1*) wykonuje tylko ruch obrotowy, który jest przekazywany z silnika elektrycznego (*7*) poprzez przekładnię pasową (*8*), przekładnię do bezstopniowej regulacji obrotów (*6*) oraz układ kół zębatych (*4*). W celu dokładniejszego sterowania procesami cieplnymi w układzie ślimakowym jest on niekiedy, w przypadku ślimaków o dużej średnicy, wewnątrz drążony, aby można go było chłodzić (*5*) wodą lub sprężonym powietrzem. Łożysko (*3*) przenosi obciążenie osiowe powstające w wyniku ciśnienia panującego w układzie ślimakowym. Aby granulki tworzywa w zasobniku (*2*) nie ogrzewały się i uplastyczniały, a poprzez to nie zlepiały i nie utrudniały pobierania ich przez ślimak oraz aby ciepło z układu uplastyczniającego nie przenosiło się do układu napędowego, cylinder w okolicy zasobnika jest chłodzony wodą (*9*). Budowę i działanie układu uplastyczniającego omówiono w rozdziale 1. W tym miejscu należy dodać, że wentylatory (*10*) ułatwiają sterowanie procesami cieplnymi w układzie ślimakowym. Z przeciwnej strony układu ślimakowego w stosunku do układu napędowego znajduje się narzędzie — głowica wytłaczarska (*12*). Ważnymi elementami głowicy są filtr tworzywa (*11*) i dysza (*13*), bezpośrednio nadająca wytłoczynie żądany kształt i wymiary w przekroju poprzecznym przy uwzględnieniu efektu Barusa i zjawiska skurczu.



Rys. 3.1. Wytłaczarka jednoślimakowa: a) schemat wytłaczarki klasycznej z narzędziem; *A* — układ uplastyczniający, *B* — układ napędowy, *C* — narzędzie (głowica wytłaczarska), b) wygląd wytłaczarki produkcji firmy Floataire (Wielka Brytania) o średnicy ślimaka 60 mm

Wartość liczbowa efektu Barusa bywa określana różnymi wzorami w zależności od przyjętej konwencji i możliwości pomiarowych. Całkowita, skorygowana wartość liczbowa efektu Barusa składa się z następujących efektów składowych: rozszerzenia niutonowskiego, rozszerzenia sprężystego, niesprężystego i relaksacyjnego [3.177].

Wracając do problematyki budowy i działania układu uplastyczniającego, trzeba jeszcze wspomnieć o wytłaczaniu z odgazowaniem. Pęcherze gazowe w procesie

uplastyczniania mogą powstawać wskutek obecności w tworzywie wilgoci i pozostałości lotnych, wywiązujących się z nieprzereagowanych monomerów i rozpuszczalników oraz będących produktami rozkładu cieplnego polimeru, jak również powietrza wprowadzanego z tworzywem. Pęcherze te, gdy przechodzą do wytłoczyny, pogarszają niemal wszystkie jej właściwości, łącznie z wyglądem. Istota odgazowania tworzywa polega na wytworzeniu w układzie, gdy temperatura tworzywa przekracza 100°C, raptownego spadku ciśnienia, powodującego wydzielenie się z niego części lotnych i następnie ich odprowadzenie. Przeprowadza się to najczęściej poprzez zastosowanie ślimaka z miejscową deredukcją objętości kanału (strefa odgazowania) (rys. 1.5) lub rzadziej z dwiema, ewentualnie trzema deredukcjami [3.147] i umieszczenie w otworze odgazowującym cylindra zaworu odgazowującego. Intensywność odgazowania jest zróżnicowana [3.12]. Ślimak odgazowujący składa się w zasadzie z na ogół od 2 do 4 połączonych szeregowo, współosiowych odcinków — ślimaków składowych, obracających się z jednakową prędkością, gdzie zachodzi sprężanie tworzywa o coraz mniejszej lepkości; konstrukcja odcinków musi być więc ściśle współzależna, np. powinna zapewniać natężenie przepływu tworzywa w odcinku następującym nieco większe niż w poprzedzającym, aby zabezpieczyć się przed wyciekiem tworzywa przez zawór.

Układ napędowy wytłaczarki powinien spełniać następujące wymagania:

— szeroki zakres zmienności prędkości obrotowej ślimaka, do około 1:10, z zachowaniem dużej sprawności,

— dobra stabilność prędkości obrotowej ślimaka przy zmianie obciążenia od 0 do 100%,

— stałość lub bardzo małe zmiany momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej,

— duży moment obrotowy rozruchowy, wynoszący około 1,5 momentu znamionowego,

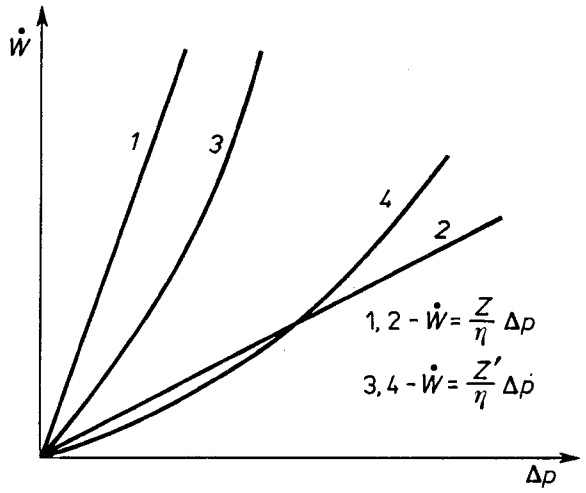
— ograniczenie maksymalnego momentu obrotowego w celu zabezpieczenia przed ewentualnym uszkodzeniem ślimaka,

— prosta obsługa i małe koszty zakupu oraz eksploatacji.

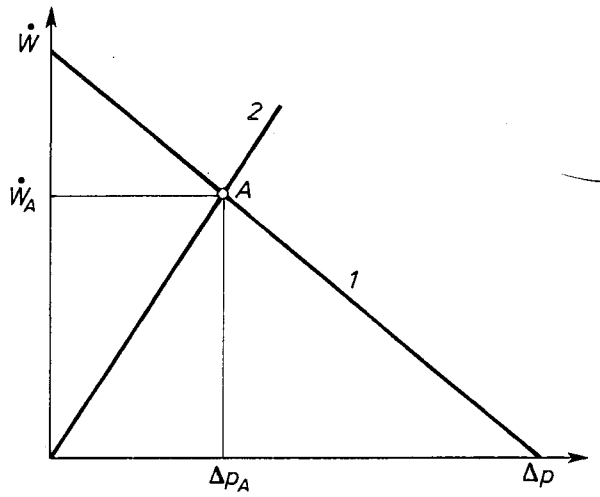
Stosowany jeszcze często układ napędowy z silnikiem komutatorowym prądu przemiennego spełnia wymienione wymagania w stopniu zaledwie dostatecznym. Jest on wypierany przez układ z silnikiem prądu stałego z regulacją tyrystorową, lecz jego główną wadę stanowi dość duży koszt zakupu. Można zaryzykować wniosek, że w przyszłościowych układach napędowych będą stosowane silniki indukcyjne klatkowe ze sterowaniem bezstopniowym tyrystorowym. Ważną częścią układu napędowego jest przekładnia redukcyjna; bliższe wiadomości na jej temat można znaleźć w literaturze [3.67] bądź w opracowaniach poświęconych przekładniom maszyn.

Podstawowe znaczenie w procesie wytłaczania ma zależność objętościowego natężenia wypływu tworzywa z układu uplastyczniającego od spadku ciśnienia tworzywa w strefie dozowania, przedstawiająca graficznie linię nazywaną charakterystyką strefy dozowania (dawniej nieściśle charakterystyką ślimaka) (rys. 1.46), rozpatrywana w połączeniu z tą samą zależnością odniesioną do dyszy głowicy wytłaczarskiej. Przepływ tworzywa w dyszy jest przepływem pod ciśnieniem tworzywa

w kanale (ciśnieniowym), w przypadku kołowego przekroju poprzecznego kanału spełniającym równania Hagena–Poiseuille'a. Zatem zależność objętościowego natężenia wypływu tworzywa z dyszy od spadku ciśnienia w dyszy przedstawia graficznie linię, która stanowi charakterystykę dyszy głowicy. Gdy tworzywo jest płynem niutonowskim, charakterystyka ta jest liniowa, gdy zaś jest płynem nieniutonowskim — nieliniowa (rys. 3.2). Obie charakterystyki, tj. charakterystyka strefy dozowania układu i charakterystyka dyszy głowicy, tworzą łącznie charakterystykę procesu wytłaczania (rys. 3.3).



Rys. 3.2. Charakterystyka dyszy głowicy wytłaczarskiej: *1* i *2* — różne dysze w przypadku płynów niutonowskich, *3* i *4* — różne dysze w przypadku płynów nieniutonowskich



Rys. 3.3. Charakterystyka procesu wytłaczania: *1* — charakterystyka strefy dozowania układu uplastyczniającego, *2* — charakterystyka dyszy głowicy wytłaczarskiej, *A* — punkt pracy wytłaczarki

Dla strefy dozowania układu i dyszy głowicy o określonych charakterystykach istnieje tylko jedna wartość spadku ciśnienia Δp i objętościowego natężenia wypływu $\dot{W}$; wyznacza ją punkt przecięcia się obu charakterystyk. Punkt ten nazwa się *punktem pracy* wytłaczarki (zaznaczono go na rys. 3.3 literą *A*). W punkcie tym spadki ciśnienia i objętościowe natężenia wypływu są sobie równe. Zatem przez porównanie zależności

(1.78) oraz $\dot{W} = Z\ \Delta p/\eta$ lub $\dot{W} = Z'(\Delta p/k)^{1/n}$ otrzymuje się

$$\alpha\, v - \frac{(\beta + \gamma)}{\eta_S} = \frac{Z}{\eta_D} \tag{3.1}$$

lub

$$\alpha v - (\beta + \gamma)\frac{\Delta p}{\eta_S} = Z'\left(\frac{\Delta p}{k}\right)^m \tag{3.2}$$

Symbolami Z oraz Z' oznaczono przewodności przepływu kanału, η_S oznacza lepkość tworzywa w strefie dozowania, η_D — lepkość tworzywa w dyszy, stałe k oraz $m = 1/n$ — parametry reologiczne modelu potęgowego, v — prędkość obrotową ślimaka, α, β oraz γ — stałe zależne od elementów geometrycznych ślimaka, wyznaczane według wzorów (1.64), (1.65) i (1.76).

Rozwiązując układ równań (1.78) oraz $\dot{W} = Z\ \Delta p/\eta$, otrzymuje się wzór na objętościowe natężenie przepływu w punkcie pracy wytłaczarki [3.7]

$$\dot{W}_A = \frac{\alpha\, v}{1 + \left(\frac{\beta + \gamma}{Z}\right)\left(\frac{\eta_D}{\eta_S}\right)} \tag{3.3}$$

oraz wzór na spadek ciśnienia w tym punkcie

$$\Delta p_A = \frac{\alpha\, v}{\frac{Z}{\eta_D} + \left(\frac{\beta + \gamma}{\eta_S}\right)} \tag{3.4}$$

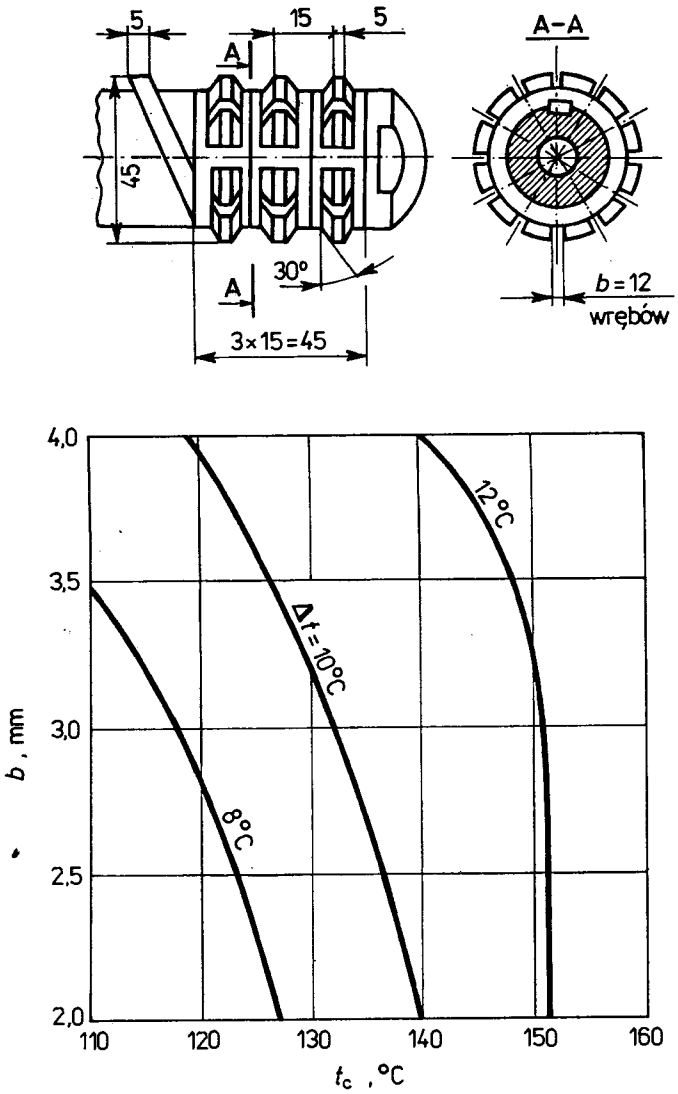
Z kolei rozwiązując układ równań (1.78) oraz $\dot{W} = Z'(\Delta p/k)^{1/n}$, otrzymuje się równanie

$$(\Delta p)^m + \frac{(\beta + \gamma)\, k^m}{\eta_S\, Z'}\,\Delta p - \frac{\alpha\, v\, k^m}{Z'} = 0 \tag{3.5}$$

Rozwiązań tego równania może być co najwyżej m. W przypadku, gdy m jest liczbą parzystą, może się zdarzyć, że równanie nie ma w ogóle pierwiastków, gdy zaś m jest nieparzyste, istnieje zawsze przynajmniej jeden pierwiastek. Sposoby wyznaczania pierwiastków zależą ściśle od m oraz od wartości stałych.

Spośród trzech grup ślimaków (rozdz. 1, p. 1.2.1) szczególne zainteresowanie budzą ślimaki specjalne. Efektywność procesu wytłaczania tymi ślimakami zależy w istotny sposób od odpowiedniej konstrukcji elementów intensywnego ścinania i mieszania. Ich zastosowanie powoduje powiększanie się mocy napędu ślimaka w stosunku do ślimaka klasycznego; nadwyżka mocy ulega głównie przemianie w strumień ciepła nagrzewający tworzywo przetwarzane. Ogólnie biorąc, grubość szczelin elementów intensywnego ścinania powinna na ogół wahać się w granicach $0{,}4 \div 0{,}9$ mm, natomiast szerokość wrębów mieszających $2{,}0 \div 4{,}5$ mm. Oba rodzaje elementów, ale zwłaszcza elementy intensywnego mieszania, powodują zmniejszanie pulsacji ciśnienia i natężenia wypływu, jak również w znacznym stopniu fluktuacji temperatury — jak podaje J. Stasiek [3.181] — do amplitudy kilku kelwinów (rys. 3.4).

Strefa rowkowana cylindra (rozdz. 1, p. 1.2.4) stabilizuje, w określonym przedziale



Rys. 3.4. Zależność amplitudy Δt krótkookresowej fluktuacji temperatury PE-LD (Politen II 003/GO) wypływającego z układu uplastyczniającego (na wlocie głowicy) od szerokości b wrębów mieszających i temperatury t_c cylindra podczas wytłaczania z zastosowaniem ślimaka specjalnego i cylindra z tuleją rowkowaną o długości $2D$ w strefie zasilania

ciśnienia tworzywa, natężenie przepływu w układzie ślimakowym. Stałe natężenie przepływu oznacza, że jest utrzymany stały kąt kierunku ruchu tworzywa niezależnie od ciśnienia. Rowki ukierunkowują ruch tworzywa, mianowicie ruch tworzywa jest zgodny z kierunkiem rowków. Przy znacznie zmniejszonej przewodności przepływu tworzywa w głowicy, spada dość intensywnie natężenie przepływu w układzie, co oznacza, że ruch w kierunku rowków nie jest już zachowany i oddziaływanie rowków jest małe. Istotna jest zatem znajomość warunków, jakie powinny być spełnione, aby tworzywo przemieszczało się zgodnie z rowkami. Warunki te J. Diakun [3.49] sprowadził do niezbędnej wartości współczynnika tarcia μ_p tworzywa, w kierunku prostopadłym do rowków. W przypadku rowków wzdłużnych

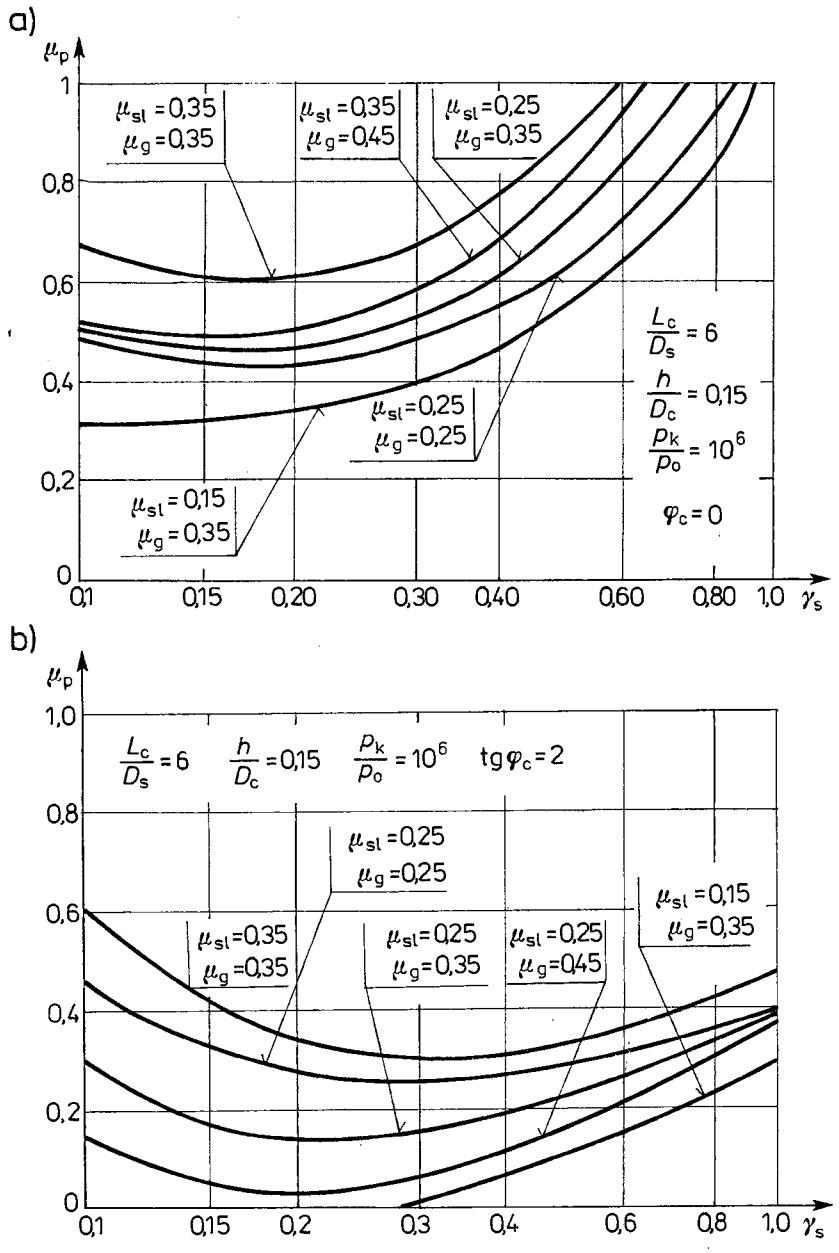
$$\mu_p = \left[\frac{\pi D_s}{L_c} \frac{\gamma_s^2}{1+\gamma_s^2} \ln \frac{p_k}{p_o} + \mu_{sl} \left(\frac{1+w}{k} + \frac{\pi D_r \gamma_s}{h\sqrt{1+\gamma_s^2}} \right) + \gamma_s \frac{1-w}{k} \right] \frac{h}{\pi D_c \gamma_s} \qquad (3.6)$$

a w przypadku rowków śrubowych prostopadłych do linii śrubowej ślimaka

$$\mu_p = \left[\frac{\pi D_s}{L_c}\frac{\gamma_s^2}{1+\gamma_s^2}\ln\frac{p_k}{p_o} + \mu_{sl}\left(\frac{1+w}{k} + \frac{\pi D_r \gamma_s}{h\sqrt{1+\gamma_s^2}}\right)\right]\frac{h\sqrt{1+\gamma_s^2}}{\pi D_c \gamma_s} \tag{3.7}$$

Oznaczenia symboli w obu zależnościach są podane w rozdz. 1, p. 1.4.1, poza tym D_c oznacza średnicę wewnętrzną cylindra; z wystarczającą dokładnością można przyjąć $D_c = D$.

Jeżeli współczynnik tarcia μ_p przyjmie wartość graniczną μ_{pg}, to układ ślimakowy wytwarza największe, graniczne ciśnienie p_{kg}, przy którym jest jeszcze utrzymany kierunek ruchu tworzywa zgodny z rowkami. Wartość tego ciśnienia wynosi w przypadku rowków wzdłużnych



Rys. 3.5. Zależność współczynnika tarcia μ_p tworzywa w kierunku prostopadłym do rowków od stromości γ_s linii śrubowej zwoju ślimaka dla różnych współczynników tarcia o ślimak μ_{sl} i cylinder μ_g w kierunku rowków: a) rowki wzdłużne (3,6), b) rowki śrubowe (3,7); φ_c — kąt kierunku rowków [3.49]

(3.8)

$$p_{kg} = p_o \exp\left\{\left[\mu_{pg}\frac{\pi D_c \gamma_s}{h} - \gamma_s \frac{1-w}{k} - \mu_{sl}\left(\frac{1+w}{k} + \frac{\pi D_r \gamma_s}{h\sqrt{1+\gamma_s^2}}\right)\right]\frac{1+\gamma_s^2}{\gamma_s^2}\frac{L_c}{\pi D_s}\right\}$$

a w przypadku rowków śrubowych

$$p_{kg} = p_o \exp\left\{\left[\mu_{pg}\frac{\pi D_r \gamma_s}{h\sqrt{1+\gamma_s^2}} - \mu_{sl}\left(\frac{1+w}{k} + \frac{\pi D_r \gamma_s}{h\sqrt{1+\gamma_s^2}}\right)\right]\frac{1+\gamma_s^2}{\gamma_s^2}\frac{L_c}{\pi D_s}\right\} \quad (3.9)$$

Przy ciśnieniu określonym podanymi wzorami, tarcie w kierunku prostopadłym do rowków jest rozwinięte. Wywołanie większego ciśnienia przez zmniejszenie przewodności przepływu w głowicy zrywa narzucony rowkami kierunek ruchu. Ciśnienie wytworzone w układzie powinno być zatem równe ciśnieniu granicznemu lub mniejsze $p_k \leqslant p_{kg}$. Gdy $p_k < p_{kg}$, siła tarcia w kierunku prostopadłym do rowków jest mniejsza od tarcia rozwiniętego i występuje wówczas mechanizm dopasowywania się wartości siły tarcia do przewodności przepływu, przy zachowaniu stałego kierunku ruchu tworzywa, czyli stałego natężenia przepływu. Na rysunku 3.5 przedstawiono wartości współczynników tarcia w kierunku prostopadłym do rowków, jakie są niezbędne do utrzymania kierunku ruchu określonego rowkami, jako funkcje stromości linii śrubowej zwoju ślimaka.

Tablica 3.1

Porównanie natężenia przepływu tworzywa i zużycia energii w procesie jednoślimakowego wytłaczania polietylenu [3.71]

Wielkość	Układ uplastyczniający	Polietylen wytłaczany		
		PE-HD	PE-LLD	PE-LD
Masowe natężenie przepływu, kg/h	bez rowków	63,5	106,6	95,2
	rowkowany	178,7	149,7	133,3
Jednostkowe względne zużycie energii całkowitej	bez rowków	1	1	1
	rowkowany	0,75	1,16	1,37

Uwaga: średnica ślimaka $D = 60$ mm, prędkość obrotowa $v = 1{,}64\ s^{-1}$.

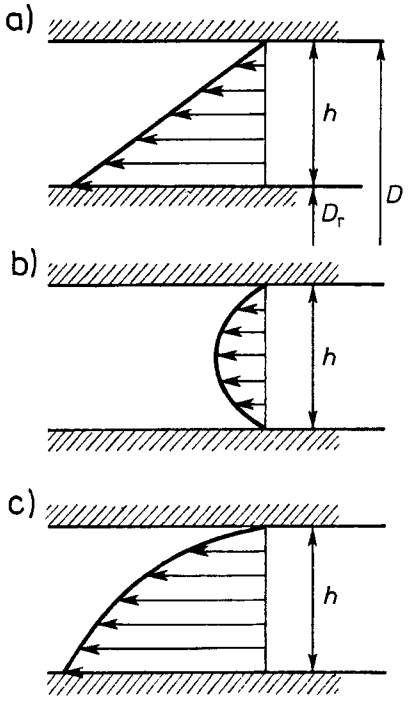
Natężenie przepływu tworzywa podczas wytłaczania z układem mającym strefę rowkowaną cylindra jest większe niż w porównywalnych warunkach z układem bez niej [3.185]. Przypisuje się to jednakowym kierunkom przepływu wleczonego i ciśnieniowego, co pokazano na rys. 3.6 (por. rys. 1.40). Powiększenie natężenia przepływu wynosi na ogół od 40 do 200% (tabl. 3.1).

Do procesu wytłaczania doprowadza się moc elektryczną $\dot{Q}_N$ silnika napędowego (tj. strumień energii elektrycznej) oraz doprowadza moc elektryczną $\dot{Q}_G$ grzejników i wentylatorów, natomiast wyprowadza się przyrost mocy cieplnej wytłoczyny $\dot{Q}_W$ (tj. przyrost strumienia energii cieplnej) i nieodzowne straty mocy cieplnej $\dot{Q}_S$. Zatem ogólne równanie bilansu mocy (strumieni energii) ma postać

$$\dot{Q}_N + \dot{Q}_G = \dot{Q}_W + \dot{Q}_S \quad (3.10)$$

a *sprawność energetyczna* η procesu wytłaczania określona jest zależnością

$$\eta = \frac{\dot{Q}_W}{\dot{Q}_N + \dot{Q}_G} 100\% \tag{3.11}$$



Rys. 3.6. Rozkłady prędkości przepływu tworzywa w przekroju wzdłużnym kanału ślimaka w procesie izotermicznym: a) przepływ wleczony, b) przepływ ciśnieniowy, c) przepływ wzdłużny (wypadkowy)

Elementy składowe zależności (3.10) i (3.11) zależą od rozwiązania konstrukcyjnego układów wytłaczarki i głowicy, rodzaju tworzywa wytłaczanego i warunków wytłaczania. Istotna jest zależność tych elementów od prędkości obrotowej v ślimaka, zaliczanej do warunków wytłaczania. Otóż ze wzrostem v powiększa się $\dot{Q}_N$, co powoduje konieczność zmniejszania $\dot{Q}_G$, gdyż całkowity strumień ciepła potrzebny do procesu wytłaczania powiększa się niezbyt intensywnie. Bywa, że udział $\dot{Q}_G$ jest mały w całym zakresie badanej prędkości obrotowej (rys. 3.7) lub na określonych odcinkach układu jest równy zeru.

Sprawność energetyczna procesu wytłaczania w przypadku ślimaków niechłodzonych dochodzi do siedemdziesięciu kilku procent, a w przypadku ślimaków chłodzonych oraz stref rowkowanych cylindra jest mniejsza, przeciętnie od kilku do kilkunastu procent.

Jednostkowe zużycie energii w procesie wytłaczania definiuje się ogólnie jako stosunek mocy do masowego natężenia przepływu, czyli jako ilość energii niezbędnej do uzyskania jednostki masy wytłoczyny. Rozróżnia się:

— jednostkowe zużycie energii napędu

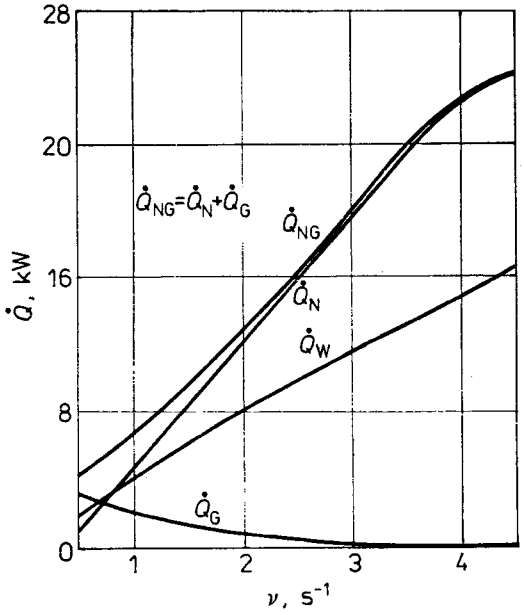
$$E_{jN} = \frac{\dot{N}_N}{\dot{G}} \tag{3.12}$$

— jednostkowe zużycie energii grzejników i wentylatorów

$$E_{jG} = \frac{\dot{N}_G}{\dot{G}} \tag{3.13}$$

— jednostkowe zużycie energii całkowitej, będące sumą wymienionych wielkości

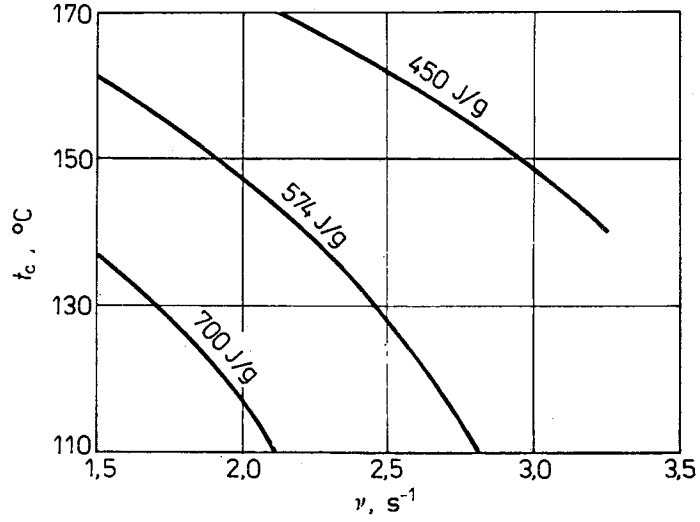
$$E_j = E_{jN} + E_{jG} \tag{3.14}$$



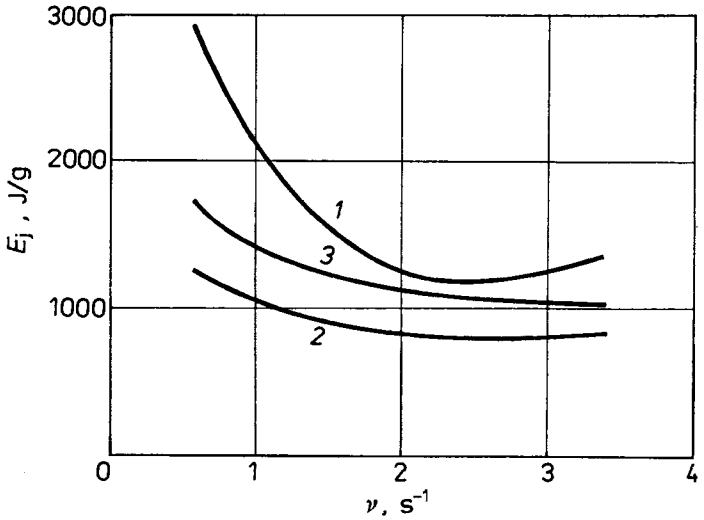
Rys. 3.7. Zależność składowych mocy $\dot{Q}$ występujących podczas wytłaczania PE-LD (Politen II 003/GO-00) w wytłaczarce ze specjalnym układem uplastyczniającym z grzejnikami półprzewodnikowymi od prędkości obrotowej ν ślimaka o $D = 45$ mm [3.161]

W badaniach doświadczalnych na ogół moc mierzy się w W lub kW, a masowe natężenie przepływu w kg/s, zatem jednostkowe zużycie energii ma wymiar W/(kg/s) = 10^{-3} J/g lub kW/(kg/s) = J/g. Szczególnie chętnie operuje się jednostkowym zużyciem energii napędu [3.180, 3.181, 3.182] i jednostkowym zużyciem energii całkowitej [3.71, 3.161, 3.167] (rys. 3.8 i rys. 3.9 oraz tabl. 3.1).

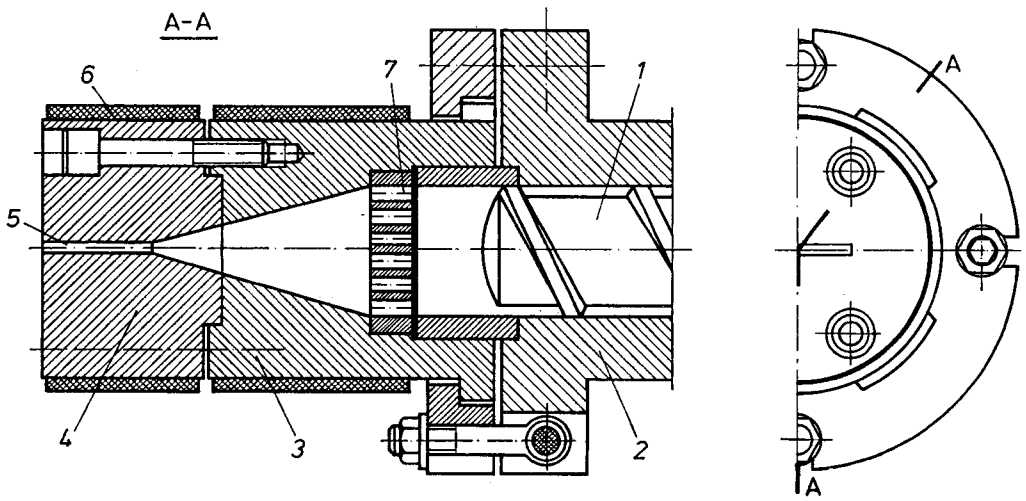
Na rysunku 3.10 przedstawiono typową głowicę wytłaczarską do otrzymywania wytłoczyny w kształcie prętów o różnych przekrojach poprzecznych przymocowaną



Rys. 3.8. Zależność jednostkowego zużycia energii napędu od temperatury t_c cylindra i prędkości obrotowej ν ślimaka podczas wytłaczania PE-LD (Politen II 003/GO): ślimak, cylinder i warunki wytłaczania jak na rys. 3.4; $b = 3$ mm [3.181]



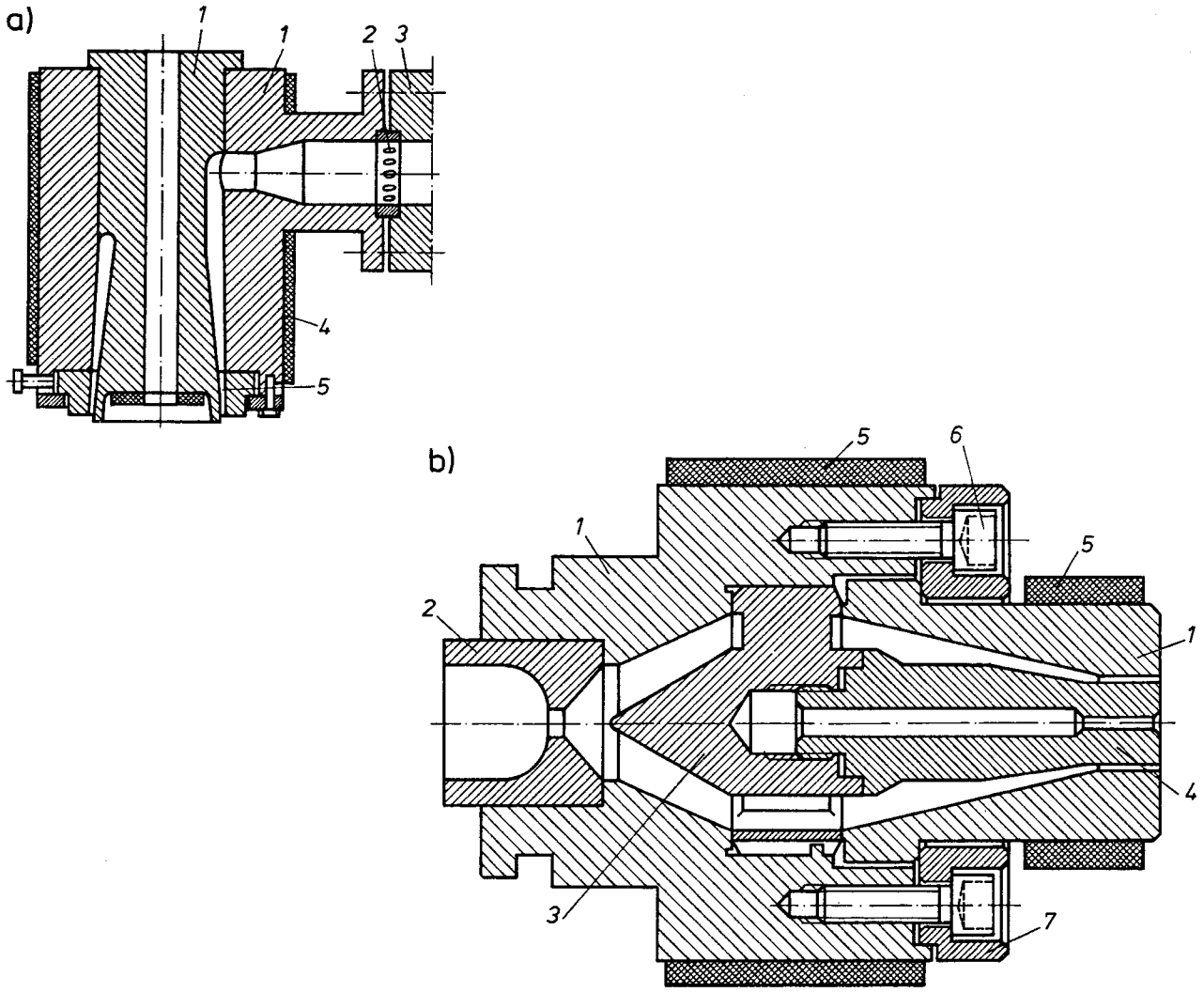
Rys. 3.9. Zależność jednostkowego zużycia energii całkowitej E_j od prędkości obrotowej v ślimaka $D = 45$ mm podczas wytłaczania PE-LD (Politen II 003/GO) w takich samych warunkach w przypadku różnych rozwiązań konstrukcyjnych ślimaka: *1* — ślimak klasyczny, *2* — ślimak niekonwencjonalny, *3* — ślimak specjalny [3.167]



Rys. 3.10. Głowica wytłaczarska liniowa do kształtowników o różnych przekrojach poprzecznych: *1* — ślimak, *2* — cylinder, *3* — korpus głowicy, *4* — końcówka głowicy, *5* — dysza, *6* — grzejniki elektryczne, *7* — filtr tworzywa

do cylindra wytłaczarki, natomiast na rys. 3.11 są pokazane głowice do wytłaczania rur.

Pokazany schematycznie na rys. 3.10 i rys. 3.11a filtr tworzywa spełnia kilka zadań, z których ważniejsze są następujące: zatrzymywanie zanieczyszczeń tworzywa w stanie stałym i niecałkowicie uplastycznionych cząstek tworzywa, zmniejszenie lub wręcz wyeliminowanie ruchu śrubowego tworzywa, będącego skutkiem przepływu w kanale śrubowym oraz znaczne ograniczenie pulsacji ciśnienia i natężenia przepływu. Podstawowym elementem filtru jest wkład filtracyjny, utworzony przez sita filtracyjne. Wymiary oczek sita wynoszą 25 ÷ 320 μm, liczba oczek przypadających na 1 cm^2 sita wynosi 400 ÷ 49 400, a powierzchnia czynna sita 31 ÷ 44,4% [3.61, 3.212].



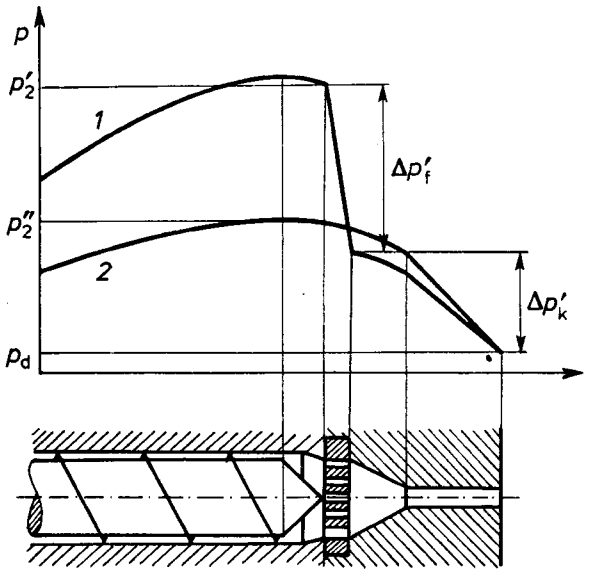
Rys. 3.11. Głowice wytłaczarskie do rur: a) schemat głowicy kątowej; *1* — korpus, *2* — filtr tworzywa, *3* — cylinder wytłaczarki, *4* — grzejniki elektryczne, *5* — dysza szczelinowa pierścieniowa, b) głowica liniowa; *1* — korpus, *2* — tuleja wytłaczarska, *3* — wspornik rdzenia, *4* — rdzeń, *5* — grzejniki elektryczne, *6* — śruby mocujące, *7* — tuleja dociskowa

Ważnym elementem głowicy jest dysza, którą należy odpowiednio ukształtować. Ciśnienie na końcu dyszy głowicy p_d jest wytworzone na skutek ciśnienia na końcu strefy dozowania p_2 zmniejszonego głównie o spadek ciśnienia na filtrze tworzywa Δp_f i w kanałach głowicy Δp_k

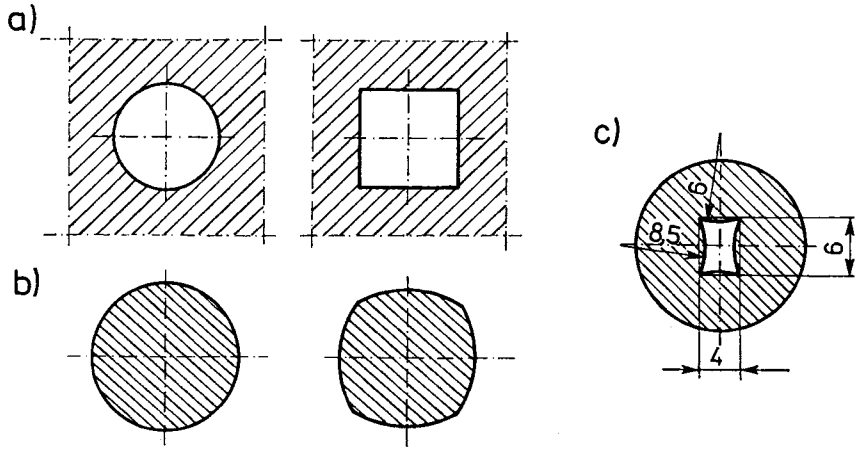
$$p_d = p_2 - \Delta p_f - \Delta p_k \tag{3.15}$$

Przebieg ciśnienia w układzie: końcowa część strefy dozowania układu uplastyczniającego–głowica wytłaczarska, pokazano na rys. 3.12. W celu zapewnienia właściwej efektywności procesu wytłaczania ciśnienie p_d powinno być stałe, z przyjętą pulsacją w danych warunkach, co osiąga się poprzez stałość jego elementów składowych. Można przyjąć, że w określonych warunkach jest to spełnione w odniesieniu do ciśnienia p_2 i spadku ciśnienia Δp_k, natomiast spadek ciśnienia Δp_f zmienia swą wartość; jest najmniejszy, gdy filtr jest czysty, i największy przy filtrze zanieczyszczonym, przy czym zakłada się ze względu na wytrzymałość mechaniczną układu

filtracyjnego [3.2], iż $\Delta p_{f\,max} < 10$ MPa. Na skutek efektu Barusa przekrój poprzeczny wytłoczyny nie jest równy przekrojowi poprzecznemu wylotu dyszy. Wzorów do obliczeń użytecznych w praktyce inżynierskiej dotychczas ciągle brak i z tego powodu przekrój poprzeczny dyszy podczas projektowania głowicy jest kształtowany wstępnie, a następnie po wykonaniu głowicy podlega korekcji, w próbach bezpośrednio z danym tworzywem na określonej wytłaczarce. Wymaga to pewnego trudu, gdy przekrój ten nie jest kołowy (rys. 3.13), a wytłoczynie stawiane są duże wymagania co do dokładności wymiarów, kształtu i położenia. Coraz częściej stosuje się jednak projektowanie głowic, w tym dysz, ze wspomaganiem komputerowym [3.107].



Rys. 3.12. Przebieg ciśnienia tworzywa w końcowej części strefy dozowania układu uplastyczniającego i w głowicy wytłaczarskiej w przypadku: *1* — głowicy z filtrem, a więc ze zmniejszoną przewodnością przepływu, *2* — głowicy bez filtru, a zatem ze zwiększoną przewodnością przepływu; pozostałe oznaczenia zgodnie z tekstem, $p_d = p_2' - \Delta p_f' - \Delta p_k'$



Rys. 3.13. Przekrój poprzeczny: a) dyszy, b) wytłoczyny, c) dyszy do wytłaczania prętów z PVC modyfikowanego twardego o wymiarach nominalnych 4 × 6 mm [3.205]

3.1.2. Wytłaczanie autotermiczne

Strumień ciepła generowany wskutek tarcia tworzywa w układzie uplastyczniającym może być wystarczający do przebiegu procesu wytłaczania, bez potrzeby stosowania grzejników mocowanych na cylindrze wytłaczarki. Wytłaczanie takie nazywa się, zgodnie z wiadomościami podanymi w rozdz. 1, p. 1.1, wytłaczaniem autotermicznym (autogenicznym). Podstawy teoretyczne tego wytłaczania opracował J.M. McKelvey w latach 1953÷54 [3.104, 3.105, 3.106], a pierwszą wytłaczarkę autotermiczną opatentował E. Beck dopiero w 1965 r. [3.129].

Do podstawowych problemów wytłaczania autotermicznego należy więc generowanie ciepła wskutek tarcia tworzywa. W literaturze jest znanych kilka ujęć i interpretacji zagadnienia generowania ciepła: od klasycznego podejścia J.M. McKelveya do kilku innych, spośród których wyróżnia się opracowanie F. Aidy z 1975 r. [3.1]. W płaszczyźnie $y-z$ kanału ślimaka (rys. 1.40) natężenie objętościowe strumienia ciepła $\dot{q}_{y-z}$ w W/m^3, jakie generuje się w tworzywie przepływającym w kanale, w wyniku tarcia wewnętrznego, przedstawia wzór

$$\dot{q}_{y-z} = \eta \left(\frac{\mathrm{d}V_z}{\mathrm{d}y}\right)^2 \tag{3.16}$$

w którym η oznacza lepkość dynamiczną tworzywa wytłaczanego. Zależność tę można z wystarczającym przybliżeniem przedstawić w postaci

$$\dot{q}_{y-z} = \eta \left(\frac{V_z}{h}\right)^2 \tag{3.17}$$

Strumień ciepła od tarcia wewnętrznego $\dot{Q}_{y-z}$ w W otrzymuje się poprzez pomnożenie $\dot{q}_{y-z}$ przez rozpatrywaną objętość kanału ślimaka, która przy założeniu stałości wynosi $b\,h\,L_s$, gdzie b oraz h oznaczają odpowiednio szerokość i głębokość kanału (rys. 1.37), L_s zaś stanowi długość kanału ślimaka (1.38)

$$L_s = \frac{L}{\sin \alpha_s} \tag{3.18}$$

Zatem

$$\dot{Q}_{y-z} = \frac{\eta V_z^2 L\, b}{h \sin \alpha_s} \tag{3.19}$$

a przyjmując, że $V_z = \pi D_s v \cos \alpha_s$ (1.56)

$$\dot{Q}_{y-z} = \frac{\pi^2 v^2 \eta D_s^2 L\, \mathrm{b} \cos^2 \alpha_s}{h \sin \alpha_s} \tag{3.20}$$

Strumień ciepła $\dot{Q}_{y-z}$ można również wyznaczyć inaczej, a mianowicie jako iloczyn momentu obrotowego M, wywołanego siłą F_s tarcia wewnętrznego, działającą na ramieniu $D_s/2$, i prędkości kątowej ω ślimaka

$$\dot{Q}_{y-z} = M\omega = \pi v F_s D_s \tag{3.21}$$

Siłę F_s określa się iloczynem naprężenia stycznego τ_s i powierzchni, na którą ono działa

$$F_s = \tau_s L_s h \tag{3.22}$$

Uwzględniając tę zależność, wzór (3.21) można napisać w postaci

$$\dot{Q}_{y-z} = \frac{\pi v \tau_s D_s L h}{\sin \alpha_s} \tag{3.23}$$

Porównując wzory (3.20) i (3.23) można wyznaczać interesujące w danych okolicznościach zależności, np. prędkość obrotową ślimaka

$$v = \frac{\tau_s h^2}{\pi \eta D_s b \cos^2 \alpha_s} \tag{3.24}$$

W płaszczyźnie $x-y$ kanału ślimaka występuje również natężenie objętościowe strumienia ciepła $\dot{q}_{x-y}$, zatem całkowite natężenie objętościowe strumienia ciepła $\dot{q}_w$ w układzie uplastyczniającym wynosi

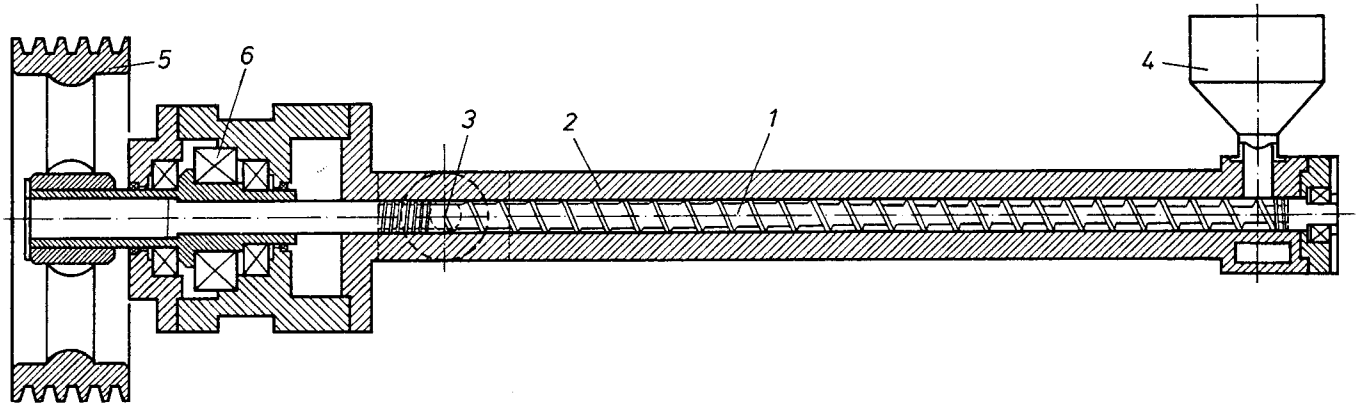
$$\dot{q}_w = \dot{q}_{y-z} + \dot{q}_{x-y} \tag{3.25}$$

a całkowity strumień ciepła tarcia wewnętrznego

$$\dot{Q}_w = \dot{Q}_{y-z} + \dot{Q}_{x-y} \tag{3.26}$$

Poza tym tworzywo jest również nagrzewane wskutek tarcia zewnętrznego, zwłaszcza gdy jest w stanie stałym. Według F. Aidy [3.1] dominujące znaczenie ma $\dot{q}_{y-z}$ oraz $\dot{Q}_{y-z}$ i często z wystarczającą dokładnością przyjmuje się $\dot{q}_{y-z} = \dot{q}_w$ oraz $\dot{Q}_{y-z} = \dot{Q}_w$.

Aby generowanie ciepła tarcia było dostateczne, prędkość obrotowa ślimaka, wyznaczana z zależności (1.24), musi być stosunkowo duża i wynosić na ogół $10 \div 17$ s^{-1}, co odpowiada prędkości obwodowej do 1,5 m/s. Z tego powodu wytłaczarki autotermiczne bywają też nazywane szybkobieżnymi. Powoduje to duży moment obrotowy ślimaka i w konsekwencji znaczne naprężenia, zwłaszcza styczne, w jego materiale, mogące przekraczać wytrzymałość na skręcanie. Zapobiega się temu stosując ślimaki krótkie o L/D do 18 lub stosując napęd ślimaka tam, gdzie jest on bardziej wytrzymały, czyli od strony strefy dozowania, i dodatkowo łożyskując go w strefie zasilania (rys. 3.14), co zmniejsza ugięcie i drgania ślimaka.



Rys. 3.14. Zasada budowy wytłaczarki autotermicznej z napędem od strony strefy dozowania oraz łożyskowaniem z obu stron: *1* — ślimak, *2* — cylinder, *3* — wypływ tworzywa z układu (w płaszczyźnie prostopadłej do rysunku), *4* — zasobnik, *5* — koło pasowe przekładni napędowej, *6* — łożyska [3.1]

Jeżeli przyjmie się przykładowo ślimak o średnicy zewnętrznej $D = 35$ mm, głębokości kanału w strefie zasilania $h_z = 5{,}5$ mm, a w strefie dozowania $h_d = 1{,}5$ mm, przez M_k oznaczy moment skręcający ślimaka z napędem konwencjonalnym — od strony strefy zasilania, natomiast przez M_a moment skręcający ślimaka z napędem od strony strefy dozowania, to stosunek obu momentów wynosi

$$\frac{M_a}{M_k} = \frac{\tau_{max} \dfrac{\pi(D - 2h_d)^3}{16}}{\tau_{max} \dfrac{\pi(D - 2h_z)^3}{16}} = 2{,}37 \qquad (3.27)$$

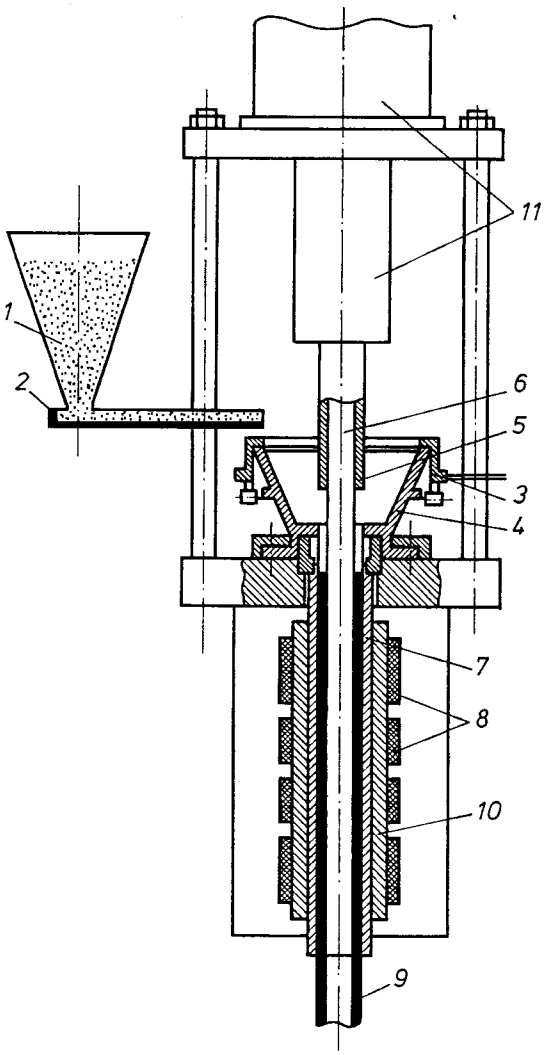
Oznacza to, że podczas stosowania napędu ślimaka od strony strefy dozowania może on przenieść moment skręcający 2,37 razy większy.

Podstawowymi zaletami wytłaczania autotermicznego są: wysoka sprawność energetyczna, gdyż ciepło powstaje bezpośrednio w tworzywie przetwarzanym, dobra homogenizacja, duże natężenie przepływu tworzywa i krótki czas przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym. Wytłaczarki autotermiczne mają mniejszą masę i mniejszą powierzchnię wymaganą do ich zainstalowania w porównaniu z wytłaczarkami klasycznymi. Występują jednak przy tym trudności w sterowaniu generowaniem ciepła wzdłuż długości układu uplastyczniającego, prowadzące do pogorszenia jakości wytłoczyny i niemożności wytłaczania wielu tworzyw. Konieczność zmieniania prędkości obrotowej ślimaka nawet dla tego samego tworzywa, ale różnych partii, powoduje wahania natężenia przepływu tworzywa, co pociąga za sobą trudności we wzajemnym dostosowywaniu się elementów składowych linii technologicznej wytłaczania. Dotychczas przeważają wady i w związku z tym wytłaczanie autotermiczne nie znalazło większego zastosowania w przemyśle; spotyka się je głównie w przypadku wytłaczania z rozdmuchiwaniem folii polietylenowej.

3.1.3. Wytłaczanie tłokowe

Z kilku możliwości wytłaczania tłokowego (rozdz. 1, p. 1.6.1) szczególne znaczenie ma wytłaczanie tłokowe politetrafluoroetylenu. PTFE charakteryzuje się bardzo małą różnicą między temperaturą topnienia i temperaturą rozkładu cieplnego, dużą lepkością w temperaturze topnienia ($10^{10} \div 10^{11}$ Pa·s w temperaturze 327 ± 10°C [3.94]) oraz wrażliwością na działanie naprężeń ścinających i ściskających, jak również małą odpornością na aglomerowanie podczas ruchu granulatu, co powoduje — jak dotychczas — niemożliwość efektywnego wytłaczania ślimakowego i konieczne staje się stosowanie wytłaczania tłokowego.

Wytłaczanie tłokowe PTFE (rys. 3.15) polega na dozowaniu z zasobnika (*1*) za pomocą rynny wibracyjnej (*2*), talerza rozdzielającego (*3*) i leja zasypowego (*4*) uprzednio przygotowanego proszku PTFE do stalowego cylindra (*7*). W cylindrze następuje zagęszczenie proszku za pomocą stempla (*5*), poruszającego się ruchem postępowo-zwrotnym, w przypadku wytłaczania rur — po trzpieniu (*6*), wywołanym układem napędowym (*11*), i wtłoczenie elementu wytłoczyny wstępnej do strefy grzejnej cylindra (*7*), zaopatrzonej w grzejniki (*8*), mocowane na rurze aluminiowej (*10*) dopasowanej do cylindra (*7*). W strefie grzejnej następuje spiekanie proszku w elemencie wytłoczyny wstępnej i łączenie kohezyjne z elementem poprzedzającym, kończące cykl procesu wytłaczania. Po zakończeniu cyklu stempel (*5*) powraca w położenie wejściowe i cykl następny rozpoczyna się od początku. Łączące się elementy tworzą wytłoczynę, która bezpośrednio opuszcza cylinder z pominięciem głowicy wytłaczarskiej [3.127, 3.146].



Rys. 3.15. Schemat wytłaczarki tłokowej do otrzymywania rur z PTFE; oznaczenia w tekście

Ciśnienie wytłaczania powodujące zagęszczenie porcji proszku, wtłoczenie jej do strefy grzejnej cylindra i ruch całej wytłoczyny, waha się w granicach $2 \div 3$ MPa przy prętach o dużych średnicach i $60 \div 80$ MPa przy rurach cienkościennych. Zbyt duże ciśnienie niweczy kohezyjne łączenie elementów. Prędkość wytłaczania ma znaczny wpływ na ciśnienie — ze wzrostem prędkości podwyższa się ciśnienie, ale jest ono ograniczone długością strefy grzejnej oraz polem przekroju poprzecznego wytłoczyny. Do jej ustalenia stosuje się wzory doświadczalne [3.178]

— w przypadku prętów kołowych o średnicy D w m

$$V_{max} = 2 \cdot 10^{-6} \frac{L}{D^{5/3}} \tag{3.28}$$

— w przypadku rur przy średnicy wewnętrznej cylindra D_c i średnicy zewnętrznej trzpienia D_t w m

$$V_{max} = 2 \cdot 10^{-6} \frac{L}{D_c^{5/3} - D_t^{5/3}} \tag{3.29}$$

gdzie V_{max} oznacza największą prędkość wytłaczania w m/s, L zaś — długość strefy grzejnej w m.

Temperatura cylindra na ogół mieści się w zakresie 340÷400°C; im niższa temperatura cylindra, tym mniejsza prędkość wytłaczania i dłuższy czas przebywania tworzywa w strefie grzejnej cylindra. Czas ten wyznacza się ze wzoru

$$T_{\min} = \frac{L}{V_{\max}} \tag{3.30}$$

ale jednocześnie zależy on od średnicy wytłaczanego pręta, zgodnie z zależnością doświadczalną

$$T_{\min} = 5 \cdot 10^5 \, D^{5/3} \tag{3.31}$$

Cylinder składa się z kilku stref następujących po sobie: zagęszczania porcji proszku — nieogrzewanej, podgrzewania elementu wytłoczyny wstępnej, spiekania i łączenia kohezyjnego elementów wytłoczyny wstępnej oraz chłodzenia wytłoczyny. Strefy podgrzewania i spiekania tworzą razem strefę grzejną o długości L, na której są mocowane grzejniki.

Tablica 3.2

Wpływ temperatury wytłaczania i czasu przebywania tworzywa w cylindrze na niektóre właściwości mechaniczne rurek z PTFE dyspersyjnego [3.94]

Warunki wytłaczania		Właściwości rurek	
temperatura, °C	czas, min	R_r, MPa	E, %
380	10,8	17,6	282
	22,3	19,7	341
	34,1	21,6	333
385	10,8	21,2	305
	22,3	24,2	363
	34,1	25,7	346
390	10,8	23,8	317
	22,3	25,8	353
	34,1	26,3	365
400	10,8	24,8	343
	22,3	25,4	379
	34,1	22,4	328

Uwaga: R_r oznacza wytrzymałość na rozciąganie, E — wydłużenie względne przy zerwaniu.

W tablicy 3.2 przedstawiono wpływ temperatury wytłaczania i czasu przebywania tworzywa w cylindrze na niektóre właściwości mechaniczne rurek z PTFE dyspersyjnego o średnicy zewnętrznej 11,7 mm i średnicy wewnętrznej 9,7 mm.

Za pomocą wytłaczania tłokowego PTFE uzyskuje się pręty o średnicy do 80 mm, rury o średnicy zewnętrznej do 300 mm i grubości ścianek od 0,1 mm do 4 mm oraz różne kształtowniki. Wytłaczając pastę pod ciśnieniem 3÷10 MPa otrzymuje się niespiekane sznury uszczelniające, a po ich walcowaniu taśmę uszczelniającą lub po

zgniataniu — płaskie uszczelki. Rodzaje i właściwości wytworów oraz warunki wytłaczania tłokowego zależą od odmiany PTFE; są one nieco odmienne dla PTFE dyspersyjnego i PTFE suspensyjnego.

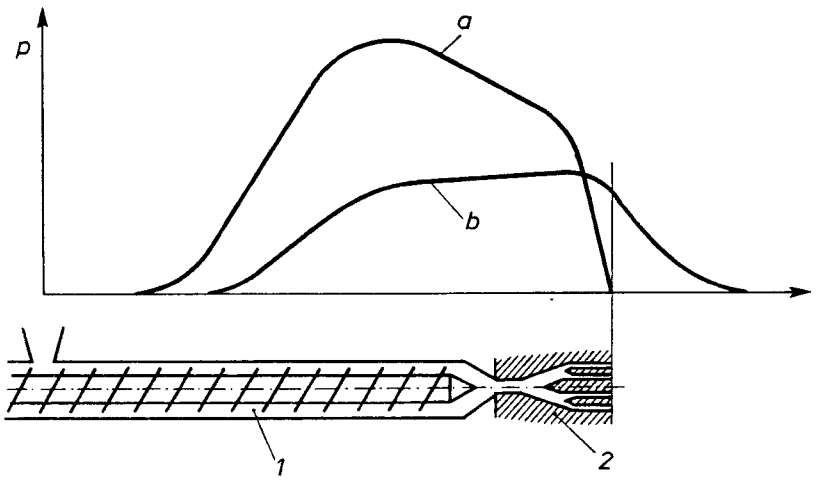
3.1.4. Wytłaczanie porujące

Wytłoczyna może mieć strukturę całkowicie litą, jak i porowatą. Wytłoczyna może być porowata w całej masie lub może mieć porowaty rdzeń, a litą warstwę zewnętrzną, czyli naskórek, o różnej grubości. Strukturę porowatą uzyskuje się dzięki wprowadzeniu do tworzywa wejściowego poroforu (gazu obojętnego, cieczy niskowrzących lub ciał stałych), który, jeżeli jest w stanie ciekłym lub stałym, przechodzi w gaz w określonych warunkach procesu wytłaczania. Często wraz z poroforem wprowadza się nukleanty — drobnoziarniste substancje stałe zarodkujące mikrobanieczki (mikropęcherzyki) gazu.

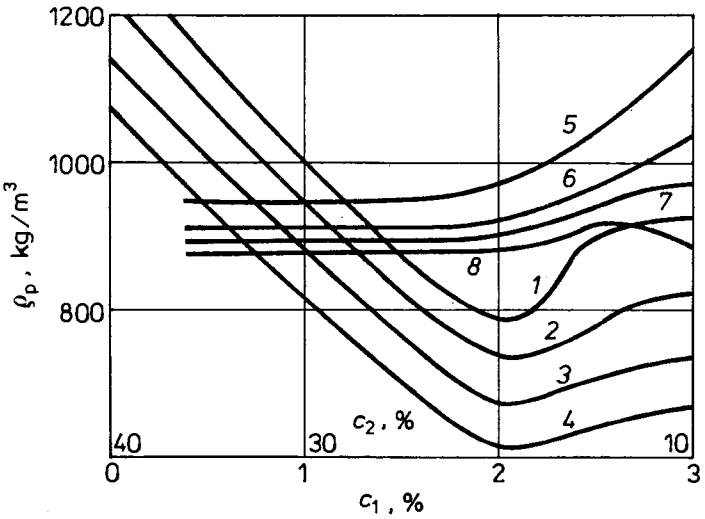
Gazy i zazwyczaj ciecze wprowadza się pod ciśnieniem, za pomocą specjalnych urządzeń, do strefy zasilania układu uplastyczniającego w czasie wytłaczania, natomiast niektóre ciecze i ciała stałe są wprowadzane do tworzywa już w procesie jego wytwarzania. Porofory podlegają takim samym procesom jak tworzywo, tj. nagrzewaniu, sprężaniu, homogenizowaniu i transportowaniu, jeszcze przed wydzielaniem gazu. Gdy w odpowiedniej temperaturze rozpoczyna się proces wydzielania gazu, tworzące się liczne mikrobanieczki ulegają natychmiast, dzięki ciśnieniu i rozwinięciu powierzchni, rozpuszczeniu w otaczającym tworzywie [3.63, 3.117]. Stosowanie ślimaków z deredukcją objętości kanału jest więc niewskazane.

Przekrój poprzeczny dyszy głowicy musi być zmniejszony w stosunku do przekroju poprzecznego wytłoczyny porowatej, gdyż formowany w dyszy przekrój jest lity, a zwiększeniu ulega dopiero podczas swobodnego porowania w momencie opuszczania dyszy i po jej opuszczeniu, przy nakładaniu się efektu Barusa. Przekroje poprzeczne kanałów głowicy powinny być stosunkowo duże, aby nie następował w nich znaczny spadek ciśnienia tworzywa, a dysza stosunkowo krótka z dużym spadkiem ciśnienia. Ciśnienie w tworzywie rośnie intensywnie wzdłuż układu uplastyczniającego, nieco spada w końcowej części układu i na początku głowicy oraz spada gwałtownie w dyszy (rys. 3.16), natomiast ciśnienie gazu rośnie najpierw dość intensywnie (ma wartości znacznie mniejsze niż ciśnienie tworzywa), później wolniej, a zaczyna spadać raptownie w końcowej części dyszy i przede wszystkim spada po opuszczeniu dyszy przez wytłoczynę.

Właściwości wytłoczyny porowatej zależą nie tylko od rodzaju tworzywa, rodzaju i zawartości poroforu oraz innych składników dodatkowych, ale również od warunków wytłaczania (rys. 3.17). Dotychczas wytłacza się przede wszystkim wytłoczyny porowate z tworzyw termoplastycznych. W zależności od gęstości pozornej ρ_p, wytłoczyny dzieli się umownie na konstrukcyjne o $\rho_p \geqslant 400$ kg/m^3, półkonstrukcyjne o $100 < \rho_p < 400$ kg/m^3 i niekonstrukcyjne o $\rho_p \leqslant 100$ kg/m^3. Wytłaczanie porujące pozwala również na otrzymywanie tworzyw o wyjątkowo dużym stopniu porowatości, aż do porowatości strukturalnej, np. w przypadku PTFE aż do rozdzielenia poszczególnych fibryl. Wytłoczyny takie mają szczególne znaczenie w medycynie [3.187].



Rys. 3.16. Przebieg ciśnienia tworzywa (*a*) oraz gazu (*b*) wzdłuż długości układu uplastyczniającego (*1*) i dyszy (*2*) [3.88]



Rys. 3.17. Zależność gęstości pozornej ρ_p PVC od zawartości c_1 poroforu (*1÷4*) i zawartości c_2 plastyfikatora (*5÷8*) przy różnych prędkościach obrotowych ślimaka: *1* — 29 s^{-1}, *2* — 52 s^{-1}, *3* — 87 s^{-1}, *4* — 94 s^{-1}, *5* — 50 s^{-1}, *6* — 60 s^{-1}, *7* — 70 s^{-1}, *8* — 80 s^{-1}; *1÷4* — D = 35 mm, *5÷8* — D = 20 mm [3.151]

Tworzywo porowate w pewnej odległości od dyszy nie jest jeszcze układem stabilnym; wskutek działania napięcia powierzchniowego na granicy faz: tworzywo–gaz oraz dyfuzji, zmniejsza się liczba porów i powiększają się ich rozmiary, dlatego wytłoczynę porowatą należy jak najszybciej ochłodzić i zestalić. Trzeba zauważyć, że ochładzanie wytłoczyny porowatej trwa dłużej niż odpowiadającej jej wytłoczyny litej, gdyż pomimo mniejszej pojemności cieplnej znacznie pogarsza się przewodzenie ciepła.

Aby otrzymać wytłoczynę z litą warstwą zewnętrzną, należy stosować specjalne odmiany kalibrowania wytłoczyny porowatej w całej masie po opuszczeniu dyszy, w czasie którego następuje szybkie ochładzanie warstwy zewnętrznej i pozbawianie jej porów, co ze względu na wytrzymałość jest w zasadzie możliwe dla wytłoczyny zaliczanej do konstrukcyjnej. Inną metodą jest współwytłaczanie, ale stanowi to oddzielny problem (punkt kolejny).

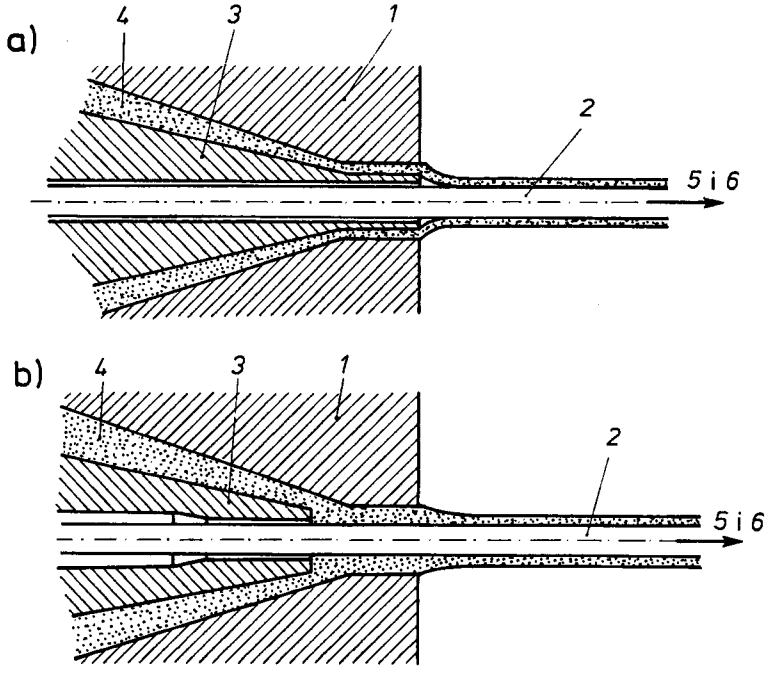
Porowaty PE stosuje się chętnie do izolacji kabli telekomunikacyjnych. Z wielu specyficznych zagadnień w tym zakresie należy wymienić konieczność wstępnego nagrzewania drutu przed powlekaniem porowatym PE do temperatury 80÷110°C, w przeciwnym bowiem przypadku przy drucie powstaje cienka warstwa tworzywa litego [3.3]. Bardzo interesujące efekty uzyskuje się wytłaczając porowaty PE z sieciowaniem, np. zauważono, że rodzaj użytego środka sieciującego nie wpływa na gęstość pozorną PE [3.76].

3.1.5. Wytłaczanie powlekające

Za pomocą wytłaczania można powlekać tworzywami różne kształtowniki, przede wszystkim kable elektryczne i telekomunikacyjne, jak również rury i taśmy.

Powlekanie kabli tworzywami termoplastycznymi, o dobrych właściwościach dielektrycznych, należy do najstarszych odmian wytłaczania, mających stosunkowo bogatą literaturę już w końcu lat pięćdziesiątych i na początku lat sześćdziesiątych [3.42, 3.153, 3.208], z należnym uznaniem w nowszych monografiach [3.67, 3.147, 3.198]. Proces powlekania odbywa się w głowicy wytłaczarskiej kątowej lub też za nią. W procesie tym łączą się adhezyjnie dwa strumienie materiałów: przemieszczający się ruchem prostoliniowym kabel i przepływające, najpierw pod pewnym kątem do niego, a później wielokrotnie zmieniające kierunek, w końcu koncentrycznie go otaczając, tworzywo.

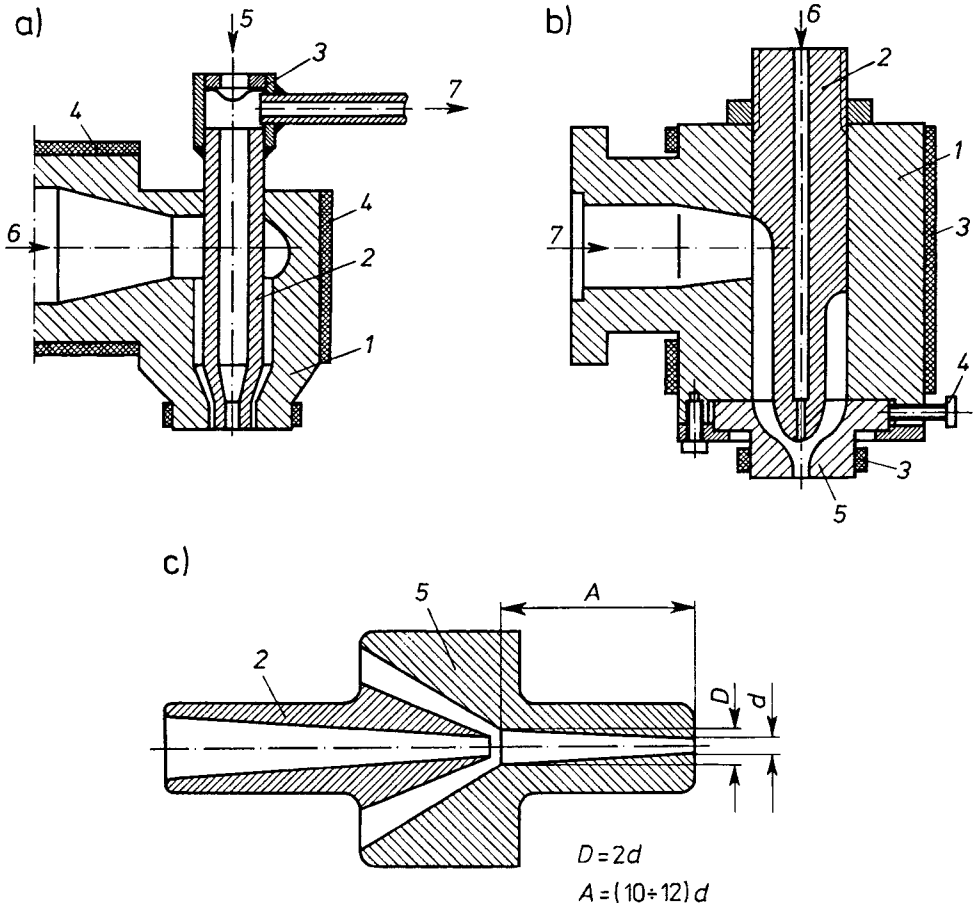
Przypadek, gdy tworzywo i kabel łączą się tuż po opuszczeniu głowicy, jest w istocie procesem wytłaczania rury i obciskania jej na kablu pod wpływem wytworzonego podciśnienia w obszarze pomiędzy nimi; dlatego nazywa się *wytłaczaniem powlekającym próżniowym* (rys. 3.18a). Główną zaletą jest tu większa możliwość



Rys. 3.18. Podstawowe możliwości wytłaczania powlekającego: a) próżniowe, b) ciśnieniowe; *1* — końcówka głowicy, *2* — kabel, *3* — prowadnik kabla, *4* — tworzywo, *5* — kierunek ruchu kabla przed powleczeniem i po nim, *6* — kierunek ruchu tworzywa wyjściowego

powlekania kabli o różnych kształtach przekroju poprzecznego, wadą zaś konieczność stosowania układu do wytwarzania podciśnienia (pompa próżniowa, przewody, układy pomiarowe i regulacyjne). W przypadku, gdy tworzywo i kabel łączą się w głowicy, a ściśle biorąc w końcowej jej części, łączenie odbywa się pod wpływem ciśnienia tworzywa w dyszy i dlatego nosi ono nazwę *wytłaczania powlekającego ciśnieniowego* (rys. 3.18b). Zasadniczą zaletę stanowi tu możliwość otrzymywania bardzo cienkich powłok, np. o grubości 0,01 mm, natomiast wadę — ograniczenie w dużym stopniu do kabli o przekroju kołowym bądź zbliżonym do niego oraz trudność w utrzymaniu jednakowej grubości powłoki na całym obwodzie kabla. Konstrukcje głowic oczywiście różnią się: na rys. 3.19 przedstawiono przykładowo głowice do obu wytłaczań powlekających.

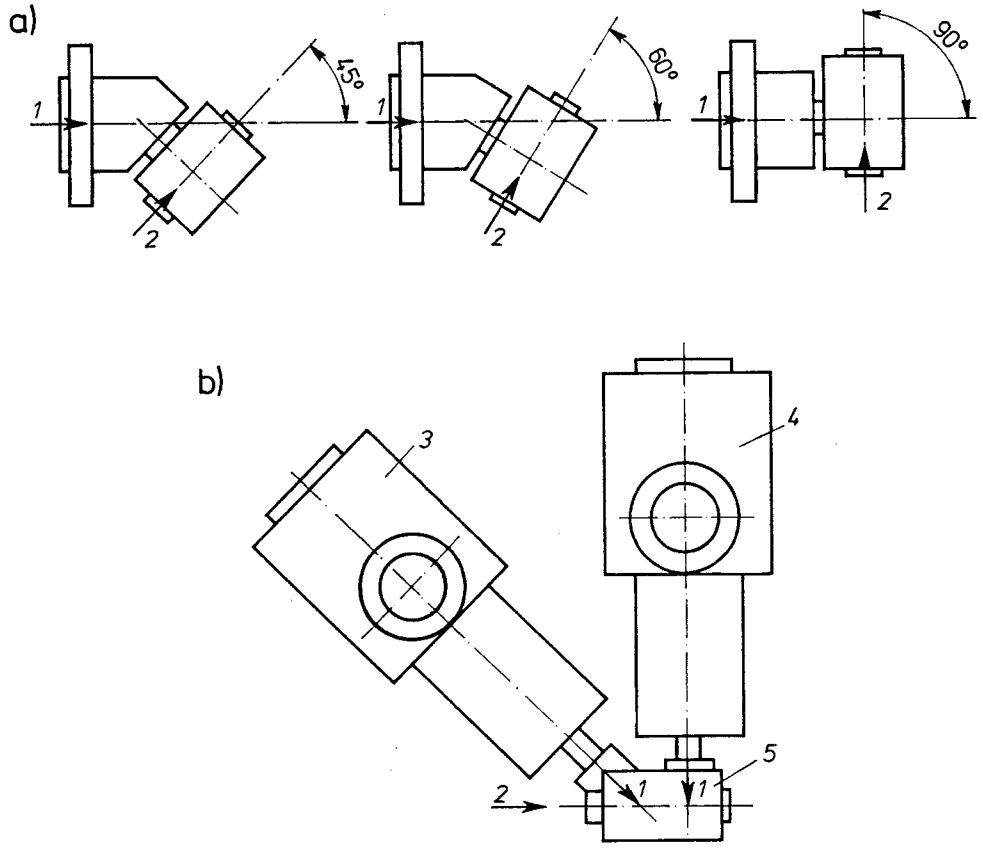
Kabel wprowadzany do głowicy jest bardzo często nagrzewany wstępnie, co powoduje rozkład znajdujących się na nim zanieczyszczeń, głównie olejów i smarów pozostających po procesie produkcyjnym, prowadzący do polepszenia adhezji, a co



Rys. 3.19. Głowice wytłaczarskie kątowe (krzyżowe) do powlekania kabli: a) głowica do wytłaczania próżniowego; *1* — korpus, *2* — prowadnik drutu, *3* — uszczelnienie, *4* — grzejniki elektryczne, *5* — kierunek ruchu kabla (oś główna głowicy), *6* — kierunek ruchu tworzywa wejściowego (oś wytłaczarki), *7* — do pompy próżniowej, b) głowica do wytłaczania ciśnieniowego; *1* — korpus, *2* — prowadnik, *3* — grzejniki, *4* — śruba centrująca, *5* — końcówka głowicy, *6* — kierunek ruchu kabla (oś główna głowicy), 7 — kierunek ruchu tworzywa wejściowego (oś wytłaczarki), c) układ prowadnik (2) – końcówka głowicy (*5*), w przypadku wytłaczania ciśnieniowego, do otrzymywania bardzo cienkich powłok

staje się konieczne podczas wytłaczania powlekającego tworzywami porowatymi (punkt poprzedni).

W głowicach kątowych kąt pomiędzy kierunkiem ruchu tworzywa wejściowego i kierunkiem ruchu kabla przed powlekaniem i po nim, czyli kąt pomiędzy osią wytłaczarki i osią główną głowicy, wynosi praktycznie $\pi/4$, $\pi/3$ lub $(\pi/2)$ rad (rys. 3.20a), ale najczęściej $(\pi/2)$ rad i wówczas głowica kątowa może nosić nazwę krzyżowej (rys. 3.19a i b). Im mniejszy kąt, tym tworzywo w głowicy jest poddawane większym zmianom kierunku ruchu, zanim zacznie koncentrycznie otaczać kabel. Głowice o mniejszych kątach pozwalają na zmniejszenie odległości pomiędzy liniami technologicznymi wytłaczania powlekającego i tym samym na lepsze wykorzystanie powierzchni hali produkcyjnej.



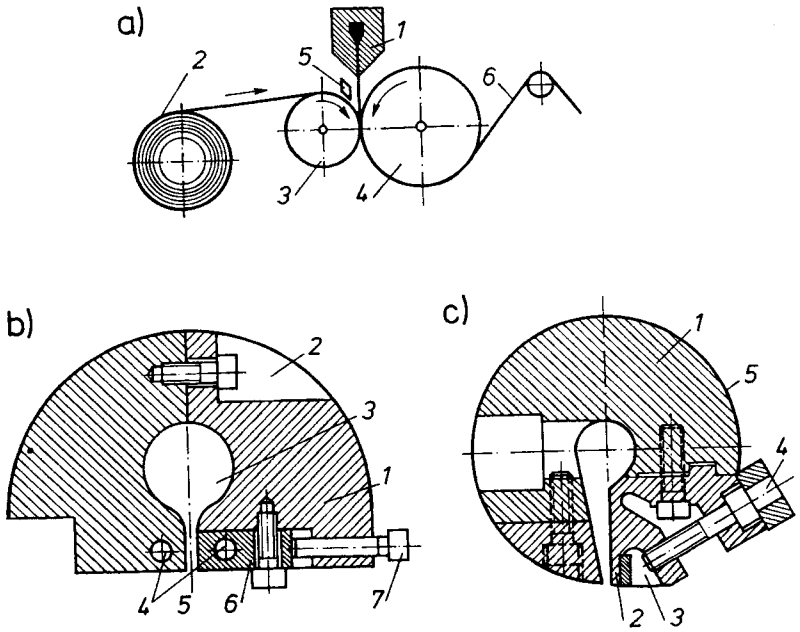
Rys. 3.20. Stosowane praktycznie usytuowania osi wytłaczarki względem osi głównej głowicy (a) oraz usytuowanie wzajemne dwu wytłaczarek i jednej głowicy (b): *1* — kierunek ruchu tworzywa wejściowego (oś wytłaczarki), *2* — kierunek ruchu kabla (oś główna głowicy), *3* — wytłaczarka do tworzywa pierwszego koloru, *4* — wytłaczarka do tworzywa drugiego koloru, *5* — głowica wytłaczarska kątowa do powlekania kabli

Gdy część powłoki na kablu ma być innego koloru, stosuje się współwytłaczanie powlekające (punkt następny), a więc stosuje się jednocześnie dwie wytłaczarki i jedną głowicę wytłaczarską kątową (rys. 3.20b).

Rury, zwłaszcza stalowe do rurociągów ropy naftowej i gazu, powleka się tworzywami termoplastycznymi w celu ochrony przed korozją. Zasady powlekania rur są takie same jak kabli, ale na ogół stosuje się powłoki wieloskładnikowe (wielotworzywowe) z reguły nakładane etapami [3.36]. Na przykład po odpowiednim

przygotowaniu warstwy wierzchniej rury na rurę nanosi się klej, wytłacza powlekająco polietylen miękki, znowu nanosi klej i znowu wytłacza powlekająco polietylen twardy.

Powlekanie tworzywami termoplastycznymi taśm z tkanin, papieru, folii metalowych lub tworzywowych odbywa się głównie poprzez bezpośrednie wytłaczanie tworzywa z głowicy szczelinowej wprost między obracające się walce, pomiędzy którymi przemieszcza się taśma (rys. 3.21). Grubość powłoki jest regulowana, na ogół od 10 μm wzwyż, nastawianiem szerokości szczeliny głowicy za pomocą listwy ruchomej sztywnej lub sprężystej.



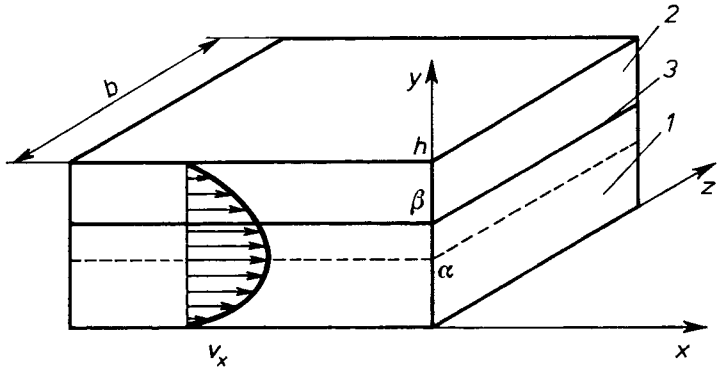
Rys. 3.21. Wytłaczanie powlekające taśm: a) schemat procesu; *1* — głowica wytłaczarska szczelinowa, *2* — zwój taśmy odwijający się, *3* — walec dociskający, *4* — walec chłodzący, *5* — grzejnik, *6* — taśma powleczona, b) przekrój poprzeczny głowicy; *1* — korpus, *2* — grzejnik, *3* — kanał rozprowadzający, *4* — ogrzewanie, *5* — dysza szczelinowa, *6* — listwa przesuwna sztywna, *7* — śruba regulacyjna listwy przesuwnej, c) przekrój poprzeczny głowicy o innym rozwiązaniu; *1* — korpus, *2* — listwa ruchoma sprężysta, *3* — wybranie powodujące odkształcenia sprężyste listwy, *4* — śruba regulacyjna listwy sprężystej, *5* — grzejnik [3.73, 3.198]

W 1985 r. w firmie Du Pont (USA) uruchomiono wytłaczanie powlekające taśmę papieru o gramaturze mniejszej niż 400 g/m^2 i szerokości 500 mm, powłoką poliestrową o grubości 12 μm, jak również współwytłaczanie powlekające w celu otrzymania powłoki pięciowarstwowej [3.52].

3.1.6. Współwytłaczanie

Względy techniczne i ekonomiczne sprawiają, że niekiedy wytłoczyna lita powinna składać się z dwóch lub więcej tworzyw różniących się właściwościami, strukturą i kolorem bądź rzadziej z tego samego tworzywa, ale o różnej strukturze i kolorach. Takie wytłoczyny otrzymuje się przede wszystkim w procesie zwanym współwytłaczaniem. Definiuje się je jako wytłaczanie, za pomocą którego uzyskuje się wytłoczynę wieloskładnikową (wielotworzywową) z jednoczesnym użyciem dwu lub

więcej wytłaczarek i jednej głowicy wytłaczarskiej. Współwytłaczanie, znane od 1967 r., rozwija się bardzo intensywnie i ma już bogatą literaturę źródłową, choć czasami w poważnych monografiach jest pomijane [3.198] bądź poświęca się mu mało uwagi [3.137, 3.147]. W Polsce [3.159] współwytłaczaniem zajmują się dotychczas R. Byczkowski i współpracownicy [3.37, 3.38].



Rys. 3.22. Przepływ laminarny współwytłaczanych tworzyw (*1*) i (*2*) w dyszy o prostokątnym przekroju poprzecznym, mającym wysokość h oraz szerokość b; *3* — płaszczyzna łączenia tworzyw, α — współrzędna na osi y, gdzie występuje największa prędkość v_x w kierunku osi x, β — współrzędna na osi y płaszczyzny łączenia tworzyw

W głowicy strumienie współwytłaczanych tworzyw łączą się, a w jej dyszy przepływają złączone razem. W przypadku dyszy o prostokątnym przekroju poprzecznym o wymiarach: wysokość h i szerokość b, przyjmuje się, że tworzywo *1* łączy się w przepływie laminarnym z tworzywem *2* w płaszczyźnie łączenia *3* (rys. 3.22). Stosując oznaczenia podane na rys. 3.22, można napisać [3.66]

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}x} = \frac{\mathrm{d}\tau_{yx}}{\mathrm{d}y} \tag{3.34}$$

Oznaczając gradient ciśnienia $\mathrm{d}p/\mathrm{d}x = -\xi$ i następnie całkując równanie (3.34), otrzymuje się dla tworzywa *1*

$$\tau_{yx1} = -\xi(y - c_1) \qquad \text{dla} \qquad 0 \leqslant y < \beta \tag{3.35}$$

i analogicznie dla tworzywa *2*

$$\tau_{yx2} = -\xi(y - c_2) \qquad \text{dla} \qquad \beta \leqslant y \leqslant h \tag{3.36}$$

gdzie c_1 oraz c_2 oznaczają stałe całkowania.

Jeżeli stosunek b/h jest dostatecznie duży, to przepływ zachodzi tylko w kierunku osi x, czyli jest prostoliniowy. Zatem

$$v_{x1} = v_{x1}(y); \quad v_{z1} = v_{y1} = 0 \quad \text{oraz} \quad v_{x2} = v_{x2}(y); \quad v_{z2} = v_{y2} = 0 \tag{3.37}$$

a warunki brzegowe mają postać

$$v_{x1} = 0 \text{ dla } y = 0 \quad \text{oraz} \quad v_{x2} = 0 \text{ dla } y = h \tag{3.38}$$

oraz

$$v_{x1} = v_{x2} \quad \text{dla} \quad y = \beta \quad \text{oraz} \quad \tau_{yx1} = \tau_{yx2} \quad \text{dla} \quad y = \beta \tag{3.39}$$

Podstawiając podane zależności do równań (3.35) oraz (3.36) uzyskuje się

$$\tau_{yx1} = -\xi(y - c) \qquad \text{dla} \qquad 0 \leqslant y < \beta \tag{3.40}$$

oraz

$$\tau_{yx2} = -\xi(y - c) \qquad \text{dla} \qquad \beta \leqslant y \leqslant h \tag{3.41}$$

gdzie $c = c_1 = c_2$ — stałe całkowania.

Przyjmując, że tworzywa przetwarzane są płynami spełniającymi model potęgowy, można napisać dla tworzywa *1*

$$\tau_{yx1} = k_1 (\dot{\gamma}_1)^{n_1} \tag{3.42}$$

gdzie prędkość ścinania

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{\mathrm{d}v_{x1}}{\mathrm{d}y} \qquad \text{dla} \qquad 0 \leqslant y < \alpha \tag{3.43}$$

$$\dot{\gamma}_1 = -\frac{\mathrm{d}v_{x1}}{\mathrm{d}y} \qquad \text{dla} \qquad \alpha \leqslant y \leqslant \beta \tag{3.44}$$

analogicznie dla tworzywa *2*

$$\tau_{yx2} = k_2 (\dot{\gamma}_2)^{n_2} \tag{3.45}$$

oraz

$$\dot{\gamma}_2 = -\frac{\mathrm{d}v_{x2}}{\mathrm{d}y} \qquad \text{dla} \qquad \beta \leqslant y \leqslant h \tag{3.46}$$

W zależności (3.42) prędkość ścinania $\dot{\gamma}_1$ zmienia znak dla $y = \alpha$, czyli wówczas, gdy prędkość jest największa i, co jest z tym związane, gradient prędkości $\mathrm{d}v/\mathrm{d}y = 0$.

Porównując prawe strony równań (3.40) i (3.42), otrzymuje się po przekształceniu

$$\dot{\gamma}_1 = \left[-\frac{\xi(y - c)}{k_1} \right]^{1/n_1} \tag{3.47}$$

Aby wyznaczyć v_{x1} należy zależność (3.43) zapisać w postaci $dv_{x1} = \dot{\gamma}_1 \, \mathrm{d}y$ i scałkować w granicach od 0 do y, następnie podstawić równanie (3.47) i dokonać kilku przekształceń, w rezultacie otrzymując

$$v_{x1}(y) = \frac{k_1}{\xi} \frac{n_1}{n_1 + 1} \left(\dot{\gamma}_{01}^{n_1+1} - \dot{\gamma}_1^{n_1+1} \right) \tag{3.48}$$

gdzie

$$\dot{\gamma}_{01} = \dot{\gamma}_1 \big|_{y=0} = \left(\frac{\xi c}{k_1} \right)^{1/n_1} \tag{3.49}$$

Zależność (3.48) jest słuszna przy $0 \leqslant y \leqslant \beta$ dla

$$\dot{\gamma}_1 = \left(\frac{\xi |c - y|}{k_1} \right)^{1/n_1} \tag{3.50}$$

Analogicznie wyznacza się prędkość v_{x2} dla tworzywa *2*

$$v_{x2}(y) = \frac{k_2}{\xi} \frac{n_2}{n_2 + 1} \left(\dot{\gamma}_{h2}^{n_2+1} - \dot{\gamma}_2^{n_2+1} \right) \tag{3.51}$$

gdzie

$$\dot{\gamma}_{h2} = \dot{\gamma}_2 \big|_{y=h} = \left[\frac{\xi(h - c)}{k_2} \right]^{1/n_2} \tag{3.52}$$

Zależność (3.51) jest słuszna przy $\beta \leqslant y \leqslant h$ dla

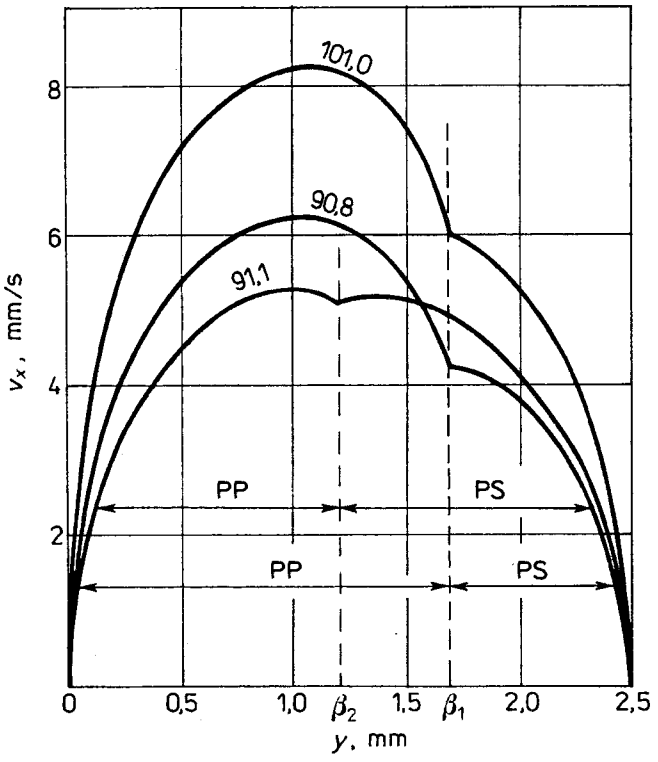
$$\dot{\gamma}_2 = \left[\frac{\xi(y-c)}{k_2}\right]^{1/n_2} \tag{3.53}$$

W zależnościach (3.48) i (3.51) występuje stała c, którą wyznacza się stosując do wymienionych równań warunek brzegowy (3.39) i następnie dokonując kilku przekształceń, co prowadzi do równania

$$\frac{n_1}{n_1+1}\left(\frac{\xi}{k_1}\right)^{1/n_1}\left[c^{(n_1+1)/n_1} - |c-\beta|^{(n_1+1)/n_1}\right] - \frac{n_2}{n_2+1}\left(\frac{\xi}{k_2}\right)^{1/n_2} \cdot \left(|h-c|^{(n_2+1)/n_2} - |\beta-c|^{(n_2+1)/n_2}\right) = 0 \tag{3.54}$$

Rozwiązanie tego równania wymaga stosowania metod selekcji i kolejnych przybliżeń oraz znajomości wartości k, n, ξ, β oraz h.

Na rysunku 3.23 przedstawiono profile prędkości przepływu podczas współwytłaczania PP i PS z użyciem głowicy o prostokątnym przekroju poprzecznym dla różnych wartości gradientu ciśnienia dp/dx (liczby umieszczone nad krzywymi) i jednakowych (β_1) oraz różnych (β_1 i β_2) udziałów składników.



Rys. 3.23. Profile prędkości przepływu w dyszy, jak na rysunku 3.21, podczas współwytłaczania PP i PS [wzory (3.48) i (3.51)]; objaśnienia w tekście

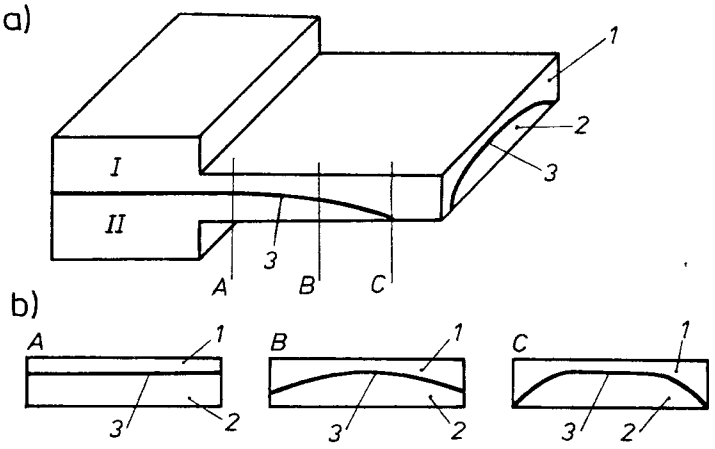
C.D. Han [3.66] wyprowadził również wzory do wyznaczania objętościowego natężenia przepływu tworzyw współwytłaczanych. W przypadku tworzywa *1* wzór ma postać

$$\dot{W} = b\left(\frac{k_1}{\xi}\right)^2 \frac{n_1}{n_1+1}\left[\left(\frac{n_2+1}{2n_1+1}\right)\dot{\gamma}_{01}^{2n_1+1} + \dot{\gamma}_{01}^{n_1+1}\,\dot{\gamma}_{\beta 1}^{n_1} - \left(\frac{n_1}{2n_1+1}\right)\dot{\gamma}_{\beta 1}^{2n_1+1}\right] \tag{3.55}$$

natomiast w przypadku tworzywa *2*

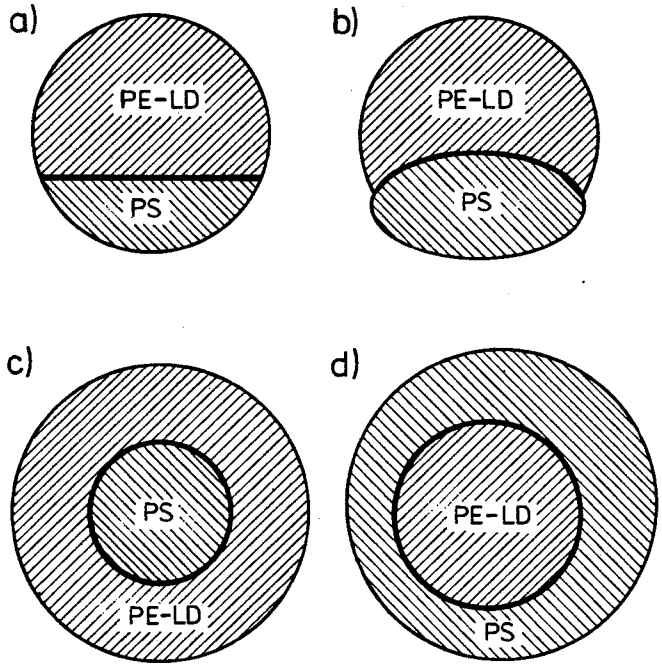
$$\dot{W} = b\left(\frac{k_1}{\xi}\right)^2 \frac{n_2}{n_2+1}\left[\left(\frac{n_2+1}{2n_2+1}\right)\dot{\gamma}_{h2}^{2n_2+1} - \dot{\gamma}_{\beta 2}^{n_2+1}\,\dot{\gamma}_{\beta 2}^{n_2} + \left(\frac{n_2}{2n_2+1}\right)\dot{\gamma}_{\beta 2}^{2n_2+1}\right] \tag{3.56}$$

W czasie przepływu przez dyszę tworzywo o mniejszej lepkości wykazuje na ogół większą skłonność do zwilżania powierzchni ścianki dyszy i otacza tworzywo bardziej lepkie. W przypadku dyszy o prostokątnym przekroju poprzecznym, pokazana na rys. 3.22 płaszczyzna łączenia tworzyw jest wyidealizowana; rzeczywista powierzchnia łączenia na wejściu do dyszy stanowi płaszczyznę, natomiast dalej staje się wypukła, co pokazano na rys. 3.24. W przypadku dyszy o przekroju kołowym, gdy część przekroju zajmuje tworzywo *1*, a część tworzywo *2*, na wejściu do dyszy powierzchnia jest płaszczyzną (rys. 3.25a), dalej zaś kształtuje się zgodnie z podaną zasadą (rys. 3.25b), gdy natomiast współwytłacza się dwa tworzywa współosiowo, wówczas współosiowość zachowuje się wzdłuż długości dyszy (rys. 3.25c) lub wraz z jej długością osie ulegają przesunięciu (rys. 3.25d).

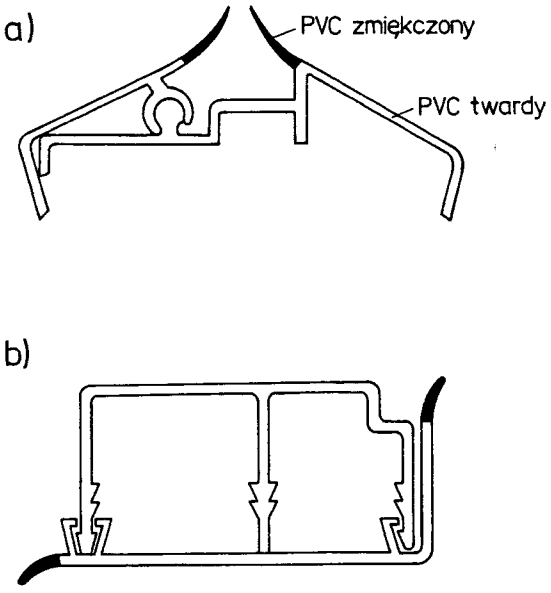


Rys. 3.24. Strumień tworzyw o przekroju prostokątnym podczas przepływu przez dyszę: *1* — tworzywo o mniejszej lepkości, *2* — tworzywo o większej lepkości, *3* — powierzchnia łączenia; *A*, *B*, *C* — przekroje przez dyszę w coraz większej odległości od wlotu

Każde tworzywo w wytłoczynie spełnia określone funkcje. Na przykład w kształtownikach współwytłaczanych z PVC twardego i zmiękczonego, stosowanych w budownictwie, takich jak listwy przyszybowe i przypodłogowe (rys. 3.26), PVC twardy stanowi konstrukcję nośną, natomiast PVC zmiękczony — elementy przylgowe i uszczelniające. Do współwytłaczania tych kształtowników stosuje się głowice wytłaczarskie pokazane na rys. 3.27 i 3.28. Innym przykładem może być folia opakowaniowa pięciowarstwowa, w której tworzywo warstw zewnętrznych jest całkowicie obojętne względem materiału czy substancji pakowanej, tworzywo jednej z warstw wewnętrznych stanowi barierę dla dyfuzji tlenu, tworzywo warstwy następnej przede wszystkim przenosi obciążenia zewnętrzne i wreszcie tworzywo warstwy ostatniej ma za zadanie pogrubiać folię — jest więc nim tworzywo powszechnie

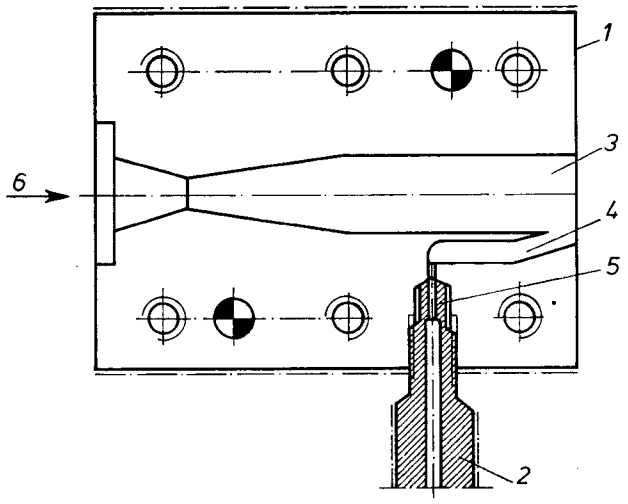


Rys. 3.25. Strumień tworzyw o przekroju kołowym podczas przepływu przez dyszę, na przykładzie PE-LD oraz PS: a) na wlocie do dyszy, b) ten sam strumień przy opuszczaniu dyszy, c) współosiowość na całej długości dyszy, d) współosiowość na wlocie i jej brak przy opuszczaniu dyszy

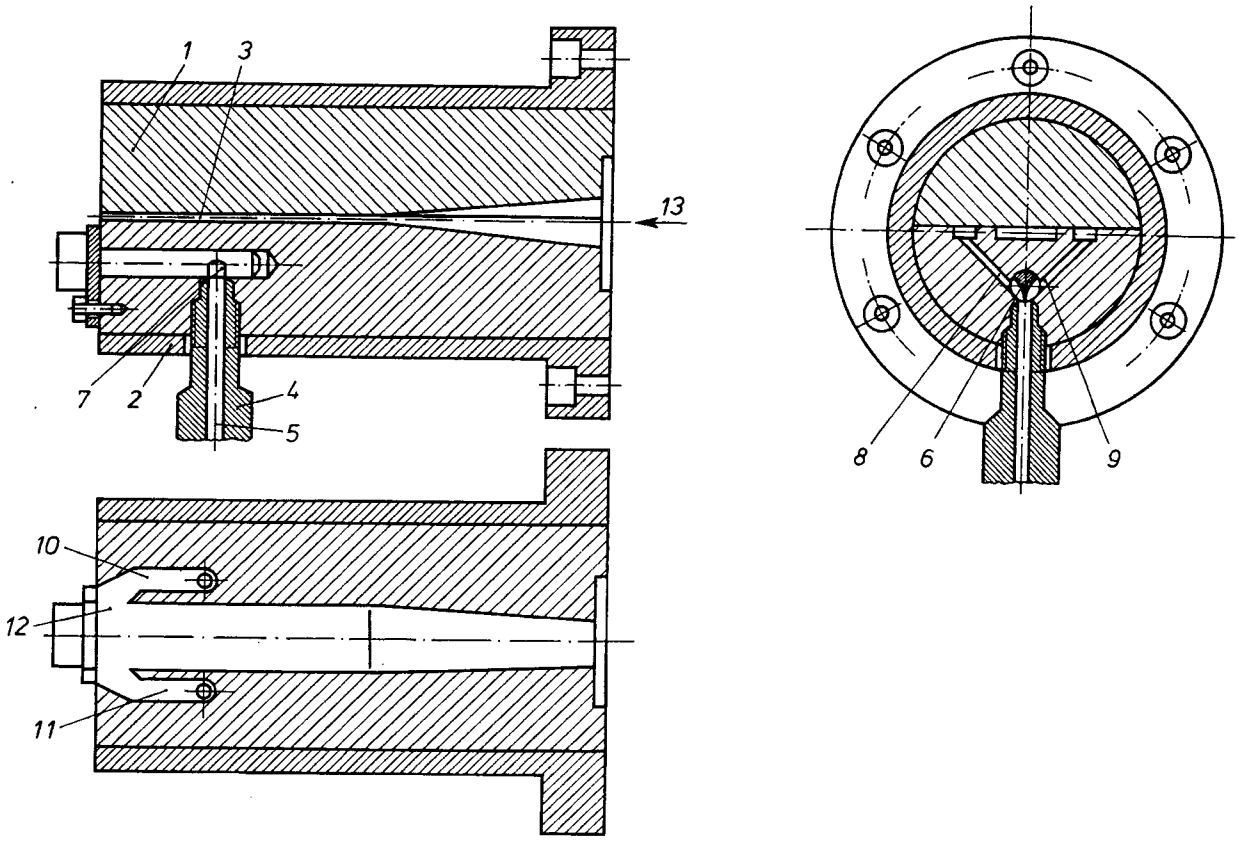


Rys. 3.26. Przykłady kształtowników współwytłaczanych z PVC twardego i zmiękczonego: a) listwa przyszybowa do skrzydełek drzwiowych, b) listwa przypodłogowa osłaniająca instalację elektryczną [3.38]

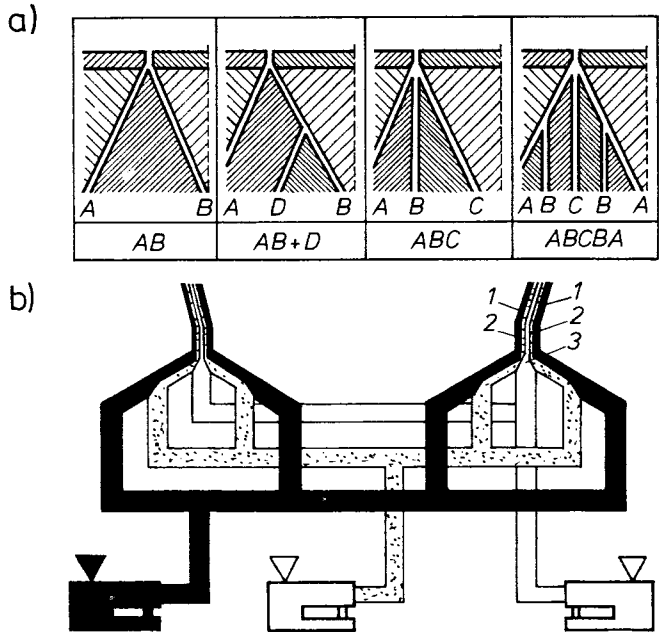
dostępne, tanie; np. tworzywo pochodzące z odpadów technologicznych lub rzadziej pouzytkowych. Folie takie otrzymuje się przede wszystkim poprzez współwytłaczanie z rozdmuchiwaniem. Ogólne możliwości łączenia tworzyw, nie tylko w odniesieniu do folii, pokazano na rys. 3.29. Za pomocą współwytłaczania można również powlekać głównie kable, rury i taśmy — nazywa się ono wówczas współwytłaczaniem powlekającym (punkt poprzedni).



Rys. 3.27. Schemat głowicy współwytłaczarskiej do strumieni PVC twardego i zmiękczonego: *1* — głowica wytłaczarska do PVC twardego, *2* — głowica wytłaczarska do PVC zmiękczonego, *3* — kanał przepływowy PVC twardego, *4* — kanał przepływowy PVC zmiękczonego, *5* — izolacja powietrzna, *6* — kierunek główny współwytłaczania [3.37, 3.38]



Rys. 3.28. Głowica współwytłaczarska do strumienia PVC twardego i dwu strumieni PVC zmiękczonego: *1* — korpus głowicy wytłaczarskiej do PVC twardego, *2* — tuleja korpusu, *3* — kanał przepływowy PVC twardego, *4* — korpus głowicy wytłaczarskiej do PVC zmiękczonego, *5* — kanał przepływowy PVC zmiękczonego, *6* — trzpień obrotowy rozdzielający strumień PVC zmiękczonego na dwa strumienie; przez jego obrót następuje zmiana proporcji natężenia przepływu obu strumieni, *7* — rowki na trzpieniu, *8* i *9* — kanały rozprowadzające PVC zmiękczony do kanałów bocznych, *10* i *11* — kanały boczne, *12* — obszar łączenia strumieni PVC, *13* — kierunek główny współwytłaczania [3.38, 3.132]



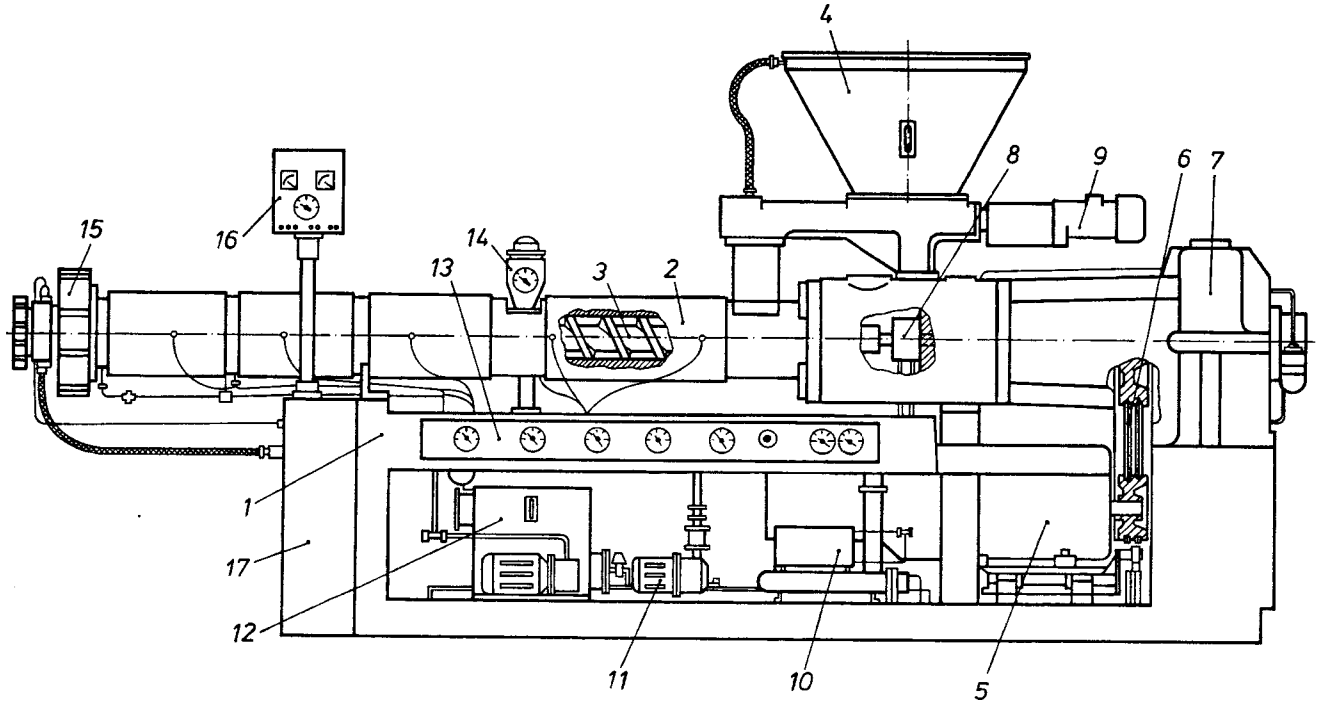
Rys. 3.29. Ważniejsze możliwości łączenia tworzyw podczas współwytłaczania: a) schematy kanałów przepływowych w głowicy współwytłaczarskiej; litery *A*, *B*, *C* oraz *D* oznaczają rodzaje tworzyw, b) przykład rozwiązania jednoczesnego współwytłaczania dwu wytworów trójskładnikowych (trójtworzywowych) przy użyciu trzech wytłaczarek i dwóch głowic [3.72]

3.1.7. Wytłaczanie dwuślimakowe

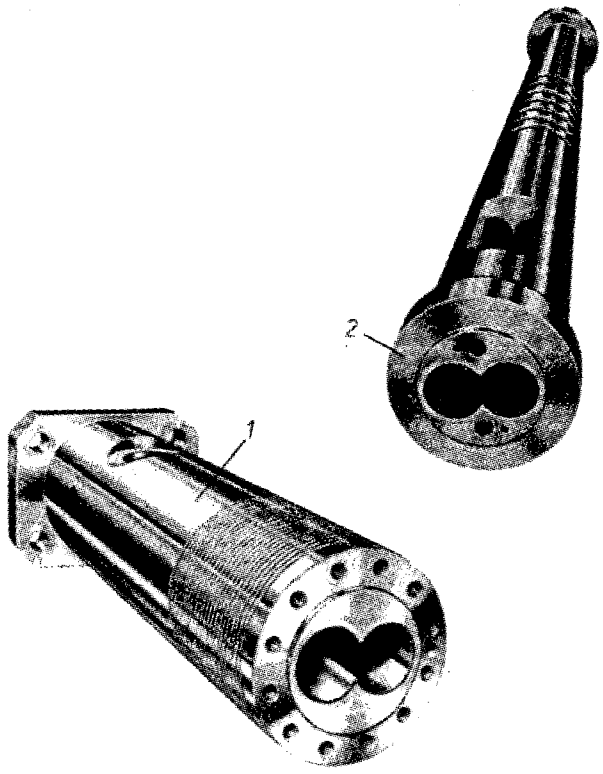
Na rysunku 3.30 jest pokazana przykładowo klasyczna wytłaczarka dwuślimakowa walcowa z zamocowanym do niej narzędziem, natomiast na rys. 3.31 przedstawiono wygląd cylindrów wytłaczarki walcowej i stożkowej. Budowa i działanie wytłaczarki wynikają z rysunków.

Tworzywo wejściowe w postaci proszku jest wprowadzane do układu uplastyczniającego w sposób wymuszony za pomocą dozownika poziomego z krótkim poziomym ślimakiem dozującym usytuowanym pod zasobnikiem (*4*), którego koniec znajduje się nad otworem wlotowym tworzywa w cylindrze, napędzanym silnikiem (*9*) (rys. 3.32). Znane są również dozowniki pionowe z krótkim ślimakiem dozującym pionowym o końcu umiejscowionym bezpośrednio w otworze wlotowym w cylindrze. Podczas wytłaczania PVC odgazowanie staje się konieczne. Na ogół stosuje się tylko otwory odgazowujące (por. p. 3.1.1), takie jak na przykład pokazane na rys. 3.33, podłączone, poprzez urządzenie do wychwytywania proszku tworzywa, do pompy próżniowej wytwarzającej ciśnienie $(270 \div 400)10^2$ Pa. W końcowych częściach ślimaków zazwyczaj następuje nadmierny wzrost temperatury, która może prowadzić do rozkładu cieplnego tworzywa. Zadaną temperaturę utrzymuje się poprzez zespół chłodzący, najczęściej olejowy; nadmiar energii cieplnej jest odprowadzany, za pośrednictwem oleju, do strefy zasilania. Temperaturę cylindra utrzymuje się na zadanym poziomie wartości dzięki zespołowi nagrzewającemu — głównie elektrycznemu, oraz chłodzącemu — przeważnie powietrznemu lub olejowemu.

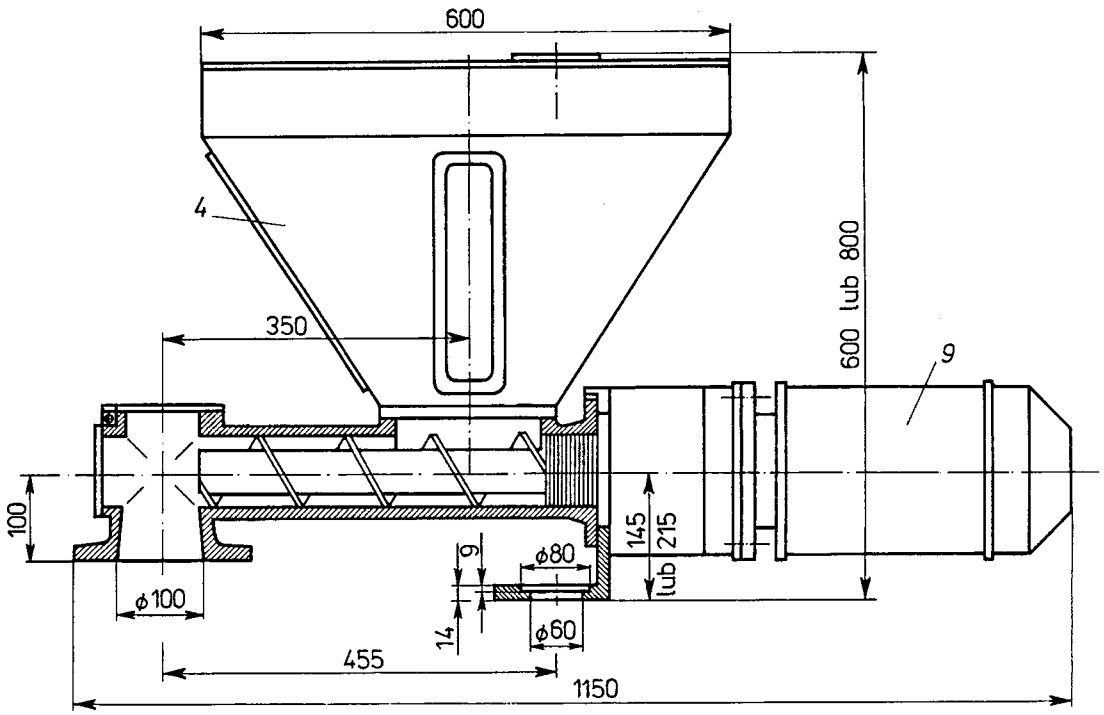
W procesie wytłaczania dwuślimakowego operuje się również, podobnie jak w procesie wytłaczania jednoślimakowego, pojęciem charakterystyki strefy dozowania



Rys. 3.30. Wytłaczarka dwuślimakowa walcowa: *1* — korpus wytłaczarki, *2* — cylinder z grzejnikami elektrycznymi, *3* — ślimaki o osiach równoległych poziomych, *4* — zasobnik, *5* — silnik napędowy główny, *6* — przekładnia pasowa, *7* — przekładnia redukcyjna, *8* — przekładnia rozdzielcza, *9* — silnik napędowy ślimaka zasilającego, *10* — zespół regulacji temperatury ślimaka, *11* — zespół odgazowujący, *12* — zespół regulacji temperatury cylindra, *13* — tablica wskaźników, *14* — nastawny wskaźnik ciśnieniowy, *15* — głowica, *16* — pulpit sterowniczy, *17* — szafka rozdzielcza



Rys. 3.31. Wygląd cylindrów wytłaczarki dwuślimakowej walcowej (*1*) i stożkowej (*2*)



Rys. 3.32. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego dozownika pionowego: średnica ślimaka 70 lub 90 mm, prędkość obrotowa ślimaka 0,18 ÷ 1,78 s^{-1}, wydajność 0,023 ÷ 0,058 m^3/h, oznaczenia *4* i *9* jak na rysunku 3.30 [3.15]

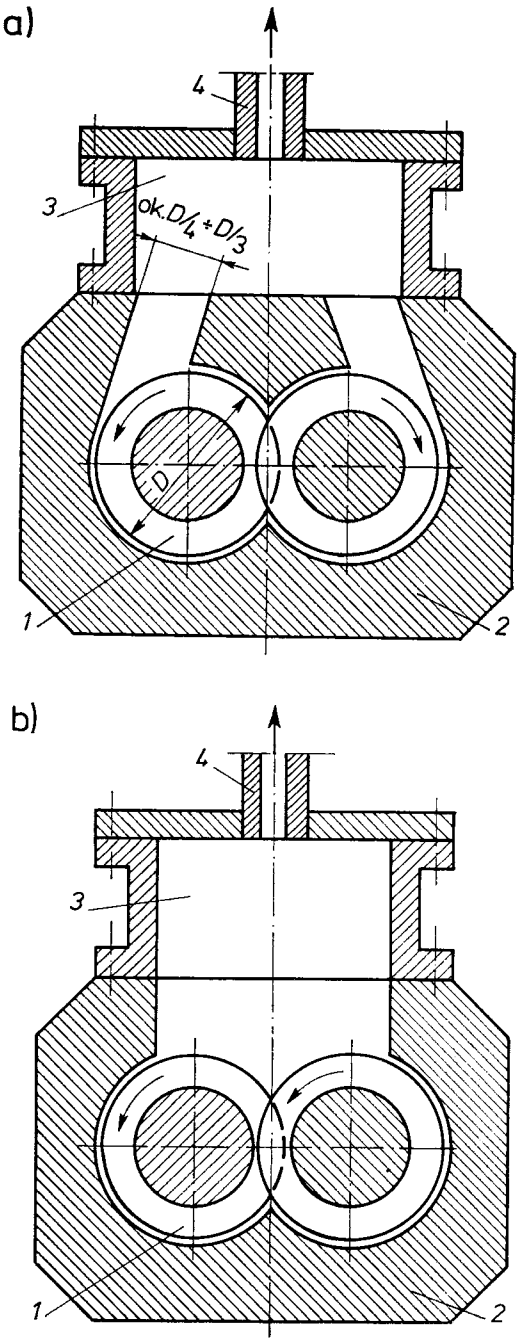
układu i charakterystyki dyszy głowicy, tworzących łącznie charakterystykę procesu wytłaczania dwuślimakowego. Na wykresie $\dot{W} = f(\Delta p)$ w punkcie przecięcia się obu wymienionych charakterystyk, czyli w punkcie pracy wytłaczarki, spadki ciśnienia i objętościowe natężenia przepływu tworzywa, odniesione do strefy dozowania i do dyszy, są sobie równe. Przeto przez porównanie zależności (1.94) oraz $\dot{W} = Z\,\Delta p/\eta$ lub $\dot{W} = Z'(\Delta p/k)^{1/n}$ otrzymuje się analogicznie do wzorów (3.1) i (3.2) następujące równania:

$$\dot{W}_t - \dot{W}_b - 2\,\dot{W}_s - 2\,i\,(\dot{W}_z + \dot{W}_a) = Z\,\frac{\Delta p}{\eta_D} \tag{3.57}$$

lub

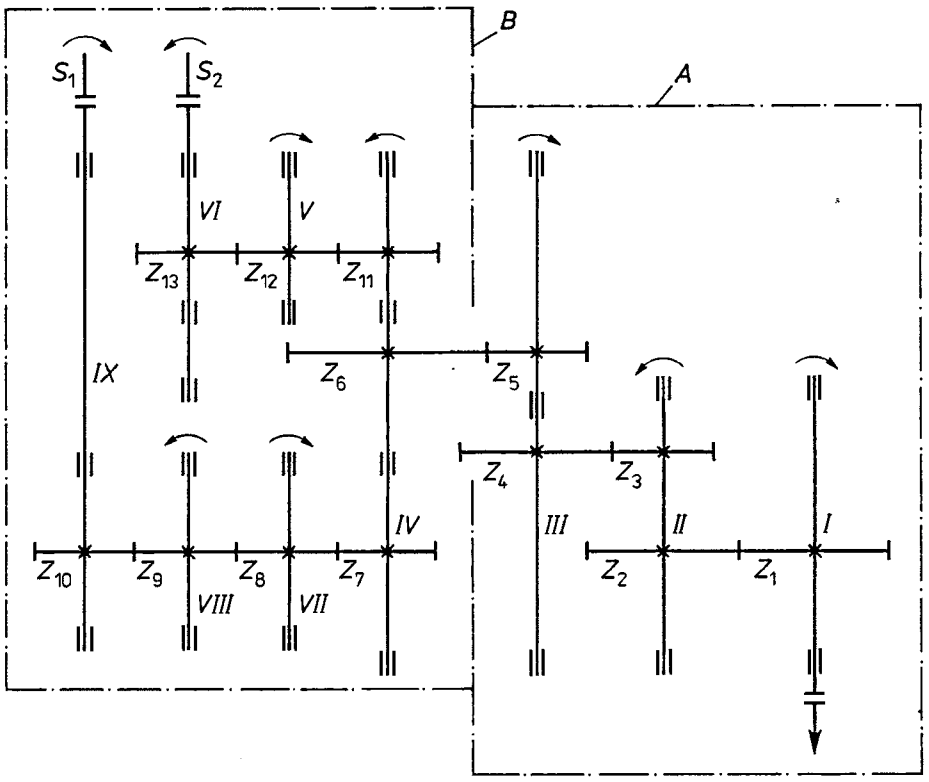
$$\dot{W}_t - \dot{W}_b - 2\,\dot{W}_s - 2\,i\,(\dot{W}_z + \dot{W}_a) = Z'\left(\frac{\Delta p}{k}\right)^m \tag{3.58}$$

Wymagania stawiane układowi napędowemu wytłaczarki są w zasadzie identyczne, jak w przypadku wytłaczarki jednoślimakowej (p. 3.1.1). Napęd z silnika jest przenoszony na ślimaki, na ogół za pomocą przekładni pasowej, a następnie za pomocą kół zębatych tworzących przekładnię napędową, która dzieli się na dwie części: redukcyjną i rozdzielczą (rys. 3.34). Prędkości obrotowe ślimaków wytłaczarek wynoszą zazwyczaj do 1 s^{-1}, natomiast silniki elektryczne, za pomocą których są napędzane ślimaki, mają prędkości obrotowe na ogół przekraczające 17 s^{-1}, co powoduje, że bezpośrednio za przekładnią pasową jest umieszczona przekładnia redukcyjna, której głównym zadaniem jest redukcja liczby obrotów. Przekładnia rozdzielcza stwarza znaczne problemy w projektowaniu i w wykonawstwie, zwłaszcza do układu przeciwbieżnego [3.79]. Duża moc napędu (do 100 kW) i mała prędkość

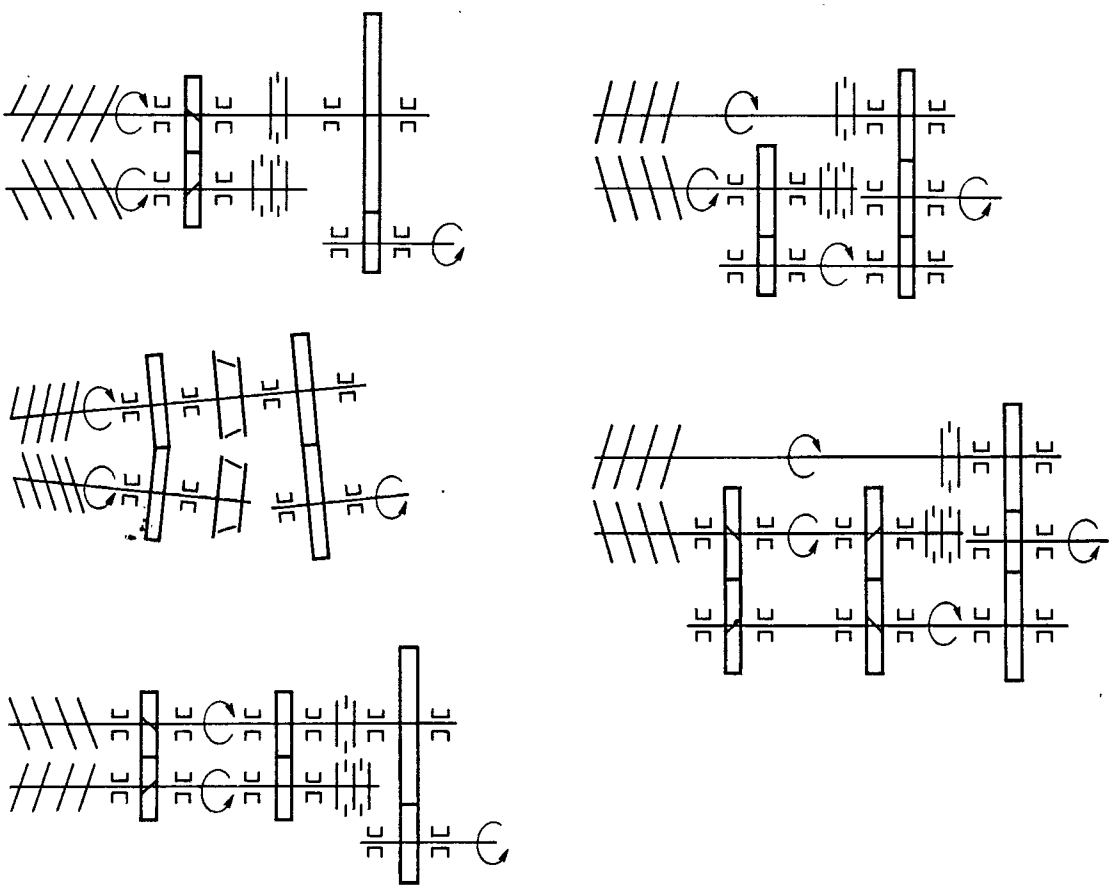


Rys. 3.33. Przekrój poprzeczny układu uplastyczniającego w obszarze odgazowania: a) układ przeciwbieżny, b) układ współbieżny; *1* — ślimaki, *2* — cylinder, *3* — komora odgazowująca, *4* — przewód do urządzenia do wychwytywania proszku tworzywa i do pompy próżniowej [3.154]

obrotowa są przyczyną, że wały napędzające ślimaki są obciążone bardzo dużymi momentami obrotowymi dochodzącymi do 15 000 N·m. Wskutek małego rozstawu osi ślimaków, koła zębate napędzające wały ślimaków muszą mieć małe średnice, co jest równoznaczne z dużymi obciążeniami i odkształceniami zębów kół, częstokroć ponad wartości warunkujące ich prawidłową współpracę. Z tego powodu spotyka się wiele różnych rozwiązań konstrukcyjnych przekładni rozdzielczych (rys. 3.35). Siły osiowe w przekładni rozdzielczej wytłaczarek dwuślimakowych stożkowych są względnie małe, gdyż wzrastające ciśnienie tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego działa na coraz mniejszą powierzchnię boczną zwojów ślimaków, co wynika z kształtu ślimaków; na ogół siły te są przenoszone przez typowe ułożyskowania oporowe. W przypadku przekładni rozdzielczej wytłaczarek dwuślimakowych walcowych siły

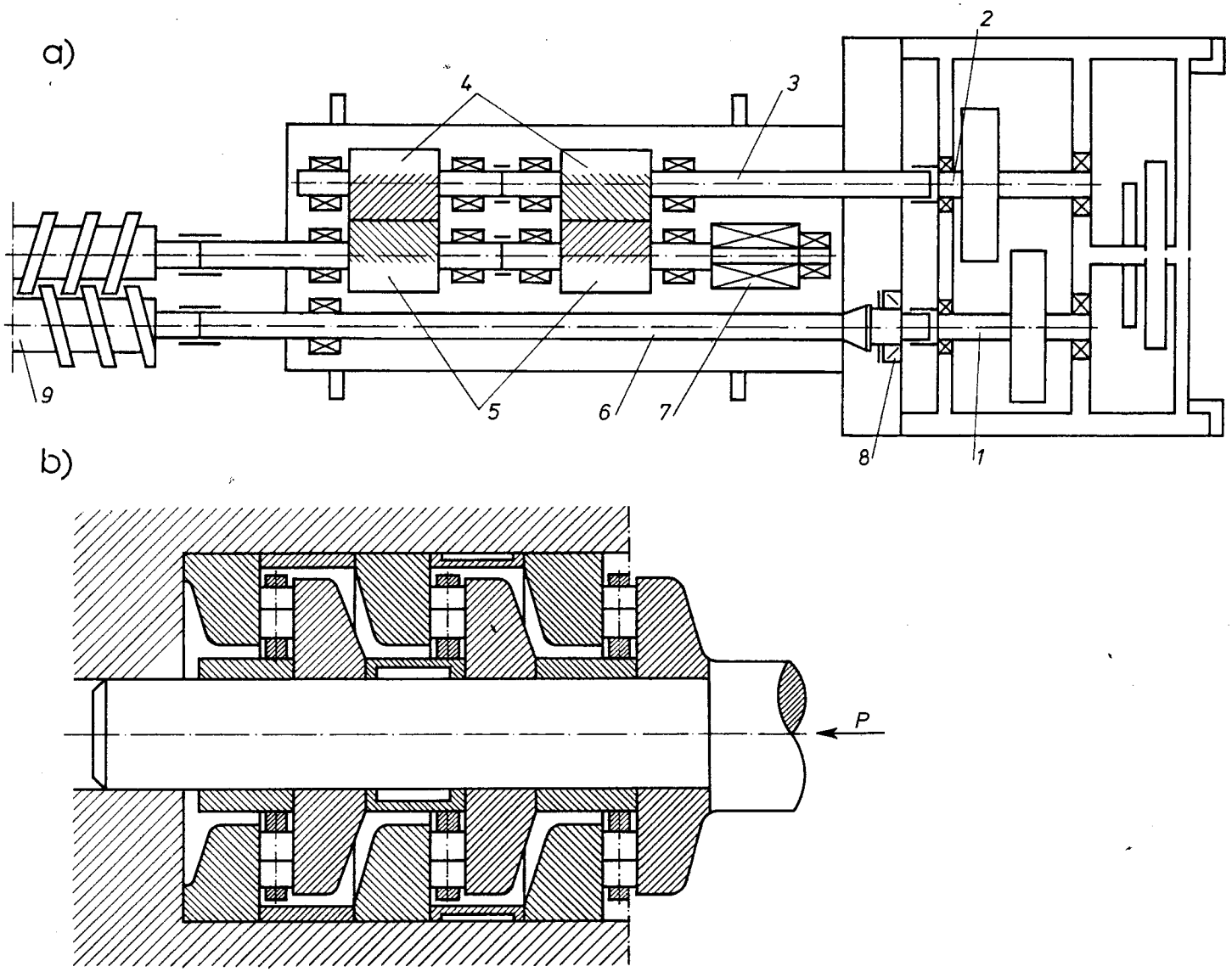


Rys. 3.34. Schemat kinematyczny przekładni wytłaczarki dwuślimakowej walcowej 2T14 (ZMCh Metalchem w Gliwicach): *A* — przekładnia redukcyjna, *B* — przekładnia rozdzielcza, $Z_1 \div Z_{13}$ — koła zębate, $I \div VI$ — osie i wały z osadzonymi kołami zębatymi, S_1 — ślimak lewy, S_2 — ślimak prawy



Rys. 3.35. Schematy przekładni rozdzielczej wytłaczarek dwuślimakowych [3.81]

osiowe dochodzą do znacznych wartości, co wymaga już ułożyskowania specjalnego (rys. 3.36).



Rys. 3.36. Schemat przekładni napędowej wytłaczarki dwuślimakowej walcowej układu przeciwbieżnego (a) i specjalnego ułożyskowania oporowego (b): *1* — wał napędzający ślimak lewy, *2* — wał napędzający ślimak prawy, *3* — wał pośredni, *4* i *5* — koła zębate walcowe, *6* — wał pośredni, *7* — specjalne ułożyskowanie oporowe, pokazane na rys. 3.36b, *8* — łożysko oporowe ślimaka lewego, *9* — ślimaki, *P* — siła osiowa ślimaka [3.183]

Zalety wytłaczarek dwuślimakowych stożkowych w porównaniu z walcowymi są przede wszystkim następujące:

— duża powierzchnia przenoszenia ciepła z cylindra do tworzywa w strefie zasilania, co umożliwia przyspieszone uplastycznianie tworzywa,

— występowanie większych prędkości ścinania tworzywa w strefie zasilania i mniejszych w strefie dozowania,

— mniejsza siła osiowa ślimaków,

— zwiększony odstęp między ślimakami za strefą zasilania, co umożliwia stosowanie typowych łożysk tocznych oporowych i promieniowych oraz racjonalną konstrukcję przekładni napędowej.

Udział ilościowy wytłaczarek dwuślimakowych w całkowitej produkcji wytłaczarek ślimakowych ocenia się przeciętnie na ponad 25%, z tym że udział wartościowy jest większy ze względu na wyższe koszty inwestycyjne wytłaczarek dwuślimakowych. W Polsce udział ilościowy jest większy [3.160]. Wytłaczarki dwuślimakowe są obecnie stosowane głównie do przetwórstwa PVC w postaci proszku.

3.2. Wtryskiwanie

Wtryskiwanie polega na cyklicznym uplastycznianiu, a następnie stapianiu tworzywa w układzie uplastyczniającym i wyciskaniu do zamkniętego gniazda formującego, zestaleniu lub utwardzeniu tworzywa, a następnie wyjęciu przedmiotu, zwanego w tym przypadku *wypraską wtryskową*, z gniazda. Proces wtryskiwania odbywa się na wtryskarkach, w których narzędziem jest forma wtryskowa mająca gniazdo formujące. W zależności od budowy układu uplastyczniającego, wtryskarki mogą być tłokowe (wtryskiwanie tłokowe), stosowane obecnie tylko w niektórych przypadkach, oraz ślimakowe (wtryskiwanie ślimakowe) — powszechnie stosowane. Pierwszą wtryskarkę tłokową opatentowali bracia J.W. i J.S. Hyatt w Stanach Zjednoczonych w 1872 r., a wtryskarkę ślimakową we współczesnym zrozumieniu opatentował H. Beck w Niemczech — RFN w 1955 r. W Polsce istotny wkład w upowszechnienie i rozwój wtryskiwania wniósł A. Smorawiński, opracowując pierwszą i dotychczas jedyną, obszerną książkę z tego zakresu [3.170]. Każda wtryskarka składa się z trzech głównych układów: układu uplastyczniającego, układu narzędziowego i układu napędowego.

3.2.1. Wtryskiwanie konwencjonalne

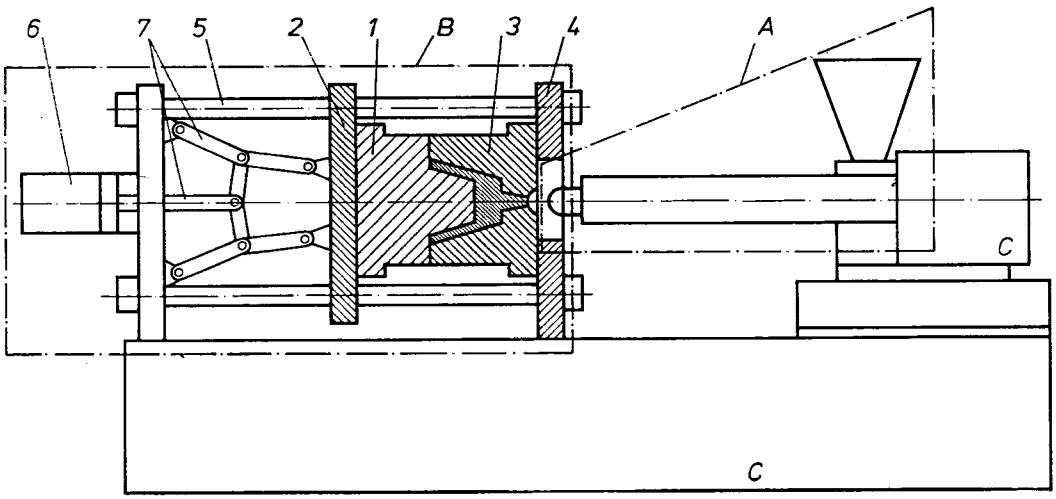
Na rysunku 3.37 przedstawiono przykładowo wtryskarkę z zamocowanym narzędziem, natomiast na rys. 3.38 schemat procesu wtryskiwania.

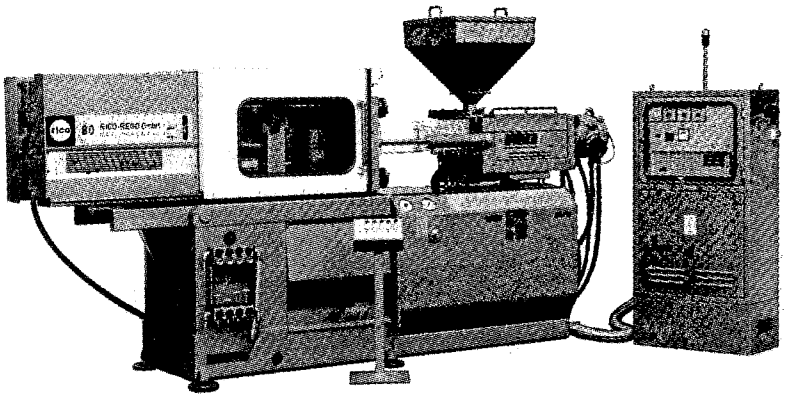
Ważną cechą procesu wtryskiwania jest jego cykliczność. *Cykl procesu wtryskiwania* składa się w istocie z następujących faz:

a) zamykanie formy wtryskowej poprzez ruch zespołu (*1*) formy zamocowanego do ruchomego stołu (*2*) wtryskarki w kierunku zespołu (*3*) formy zamocowanego do nieruchomego stołu (*4*), przy czym ruchomy stół jest przesuwany po prowadnicach (*5*) przez układ hydrauliczny, mechaniczny lub hydrauliczno-mechaniczny (*6, 7*) — faza zwana krótko *zamykaniem*,

b) dosuwanie układu uplastyczniającego do formy wtryskowej, tak aby dysza wtryskowa (*8*) zetknęła się z tuleją wtryskową (*9*) formy, następnie dosuwanie za pomocą układu hydraulicznego (*10*) ślimaka (*11*) bądź tłoka wtryskowego powodujące wyciśnięcie ciekłego tworzywa przez dyszę do gniazda (*12*) formy i jego wypełnienie — faza zwana krótko *wtryskiem*,

c) uzupełnienie tworzywa w gnieździe formy, poprzez nieduże dosunięcie ślimaka lub tłoka wtryskowego w celu wyrównania zmniejszania się objętości tworzywa w wyniku skurczu pierwotnego zestalania lub utwardzania — faza zwana krótko *dociskiem*,





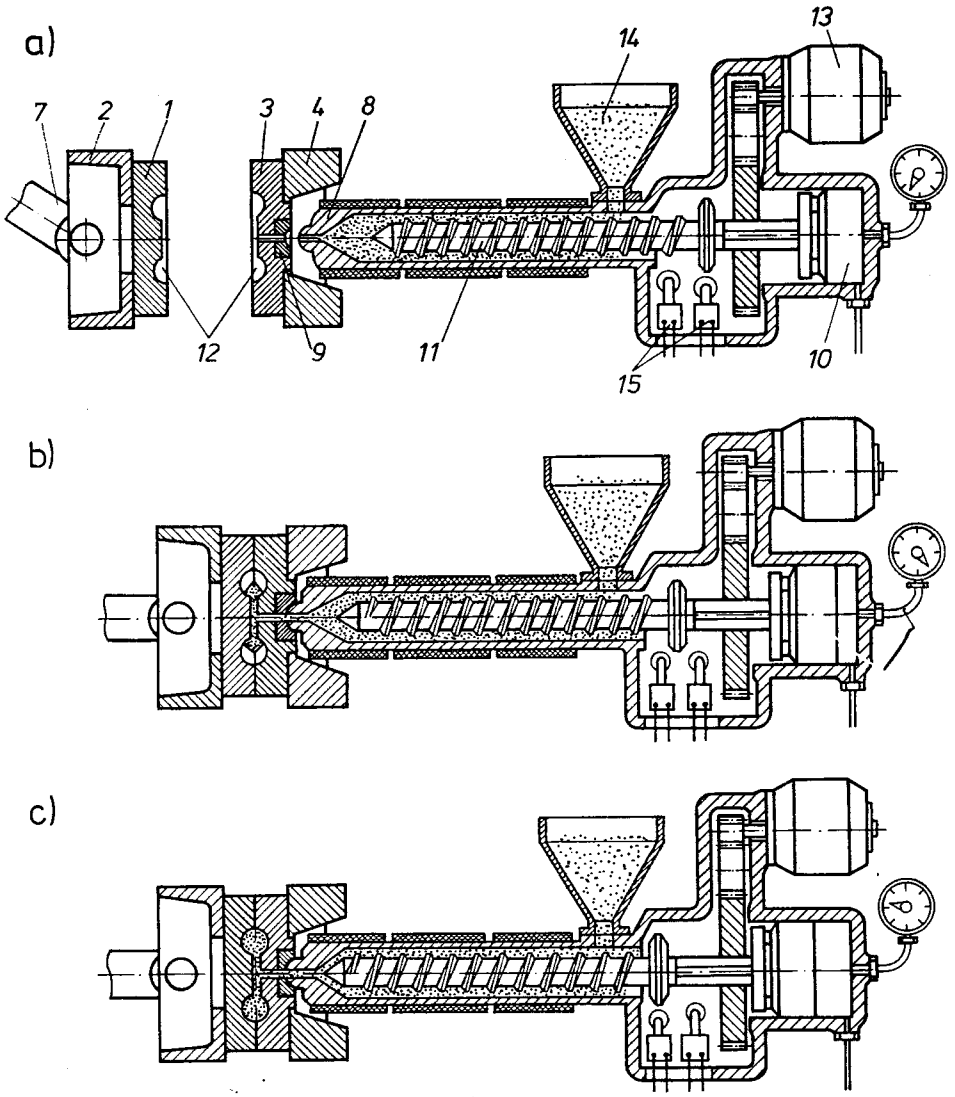
Rys. 3.37. Wtryskarka: a) schemat klasycznej wtryskarki poziomej ślimakowej lub tłokowej; *A* — układ uplastyczniający, *B* — układ narzędziowy, *C* — układ napędowy, pozostałe oznaczenia w tekście, b) wygląd wtryskarki ślimakowej poziomej produkcji firmy Rico-Lego GmbH Maschinenbau (Niemcy)

d) odsuwanie ślimaka bądź tłoka wtryskowego i odsuwanie układu uplastyczniającego; we wtryskarkach ślimakowych ślimak wprawiany zostaje w ruch obrotowy przez silnik (*13*), co powoduje pobieranie tworzywa, najczęściej w postaci granulek, z zasobnika (*14*) i przeprowadzenie go przez układ uplastyczniający przy zmianie jego stanu; ciśnienie w układzie przesuwa ślimak w kierunku zasobnika w położenie, które jest nastawiane (*15*) w zależności od ilości tworzywa potrzebnego do jednego wtrysku i w którym ustaje ruch obrotowy, natomiast we wtryskarkach tłokowych tłok wtryskowy przesuwa się w kierunku zasobnika, co powoduje zasypanie do cylindra następnej, odmierzonej ilości tworzywa — faza zwana krótko *uplastycznianiem*,

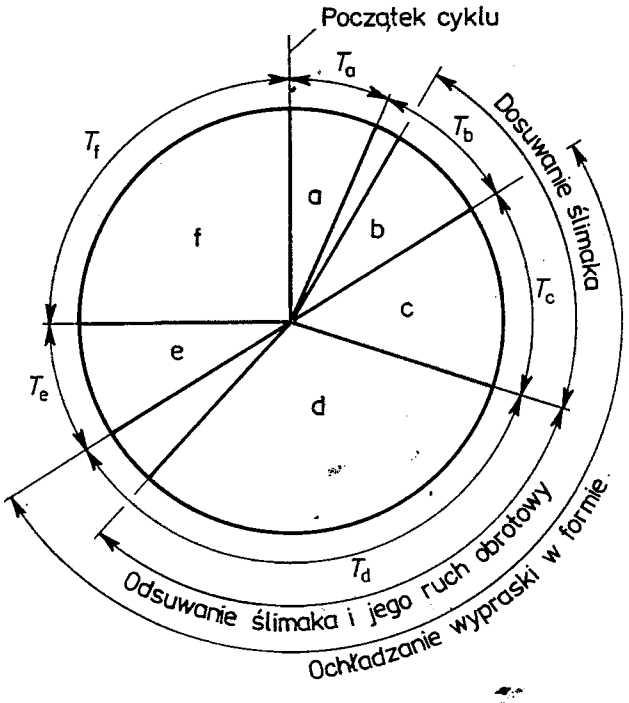
e) zmniejszanie się siły zamykającej formę wtryskową, otwieranie formy i wypychanie wypraski wtryskowej z gniazda — faza zwana krótko *otwieraniem*,

f) zabiegi przy otwartej formie, np. zakładanie rdzeni, zaprasek, powlekanie powierzchni gniazda środkiem przeciwprzyczepnym, czyszczenie formy — faza zwana krótko *przerwą*; faza ta może występować w każdym cyklu bądź okresowo, co pewną liczbę cykli.

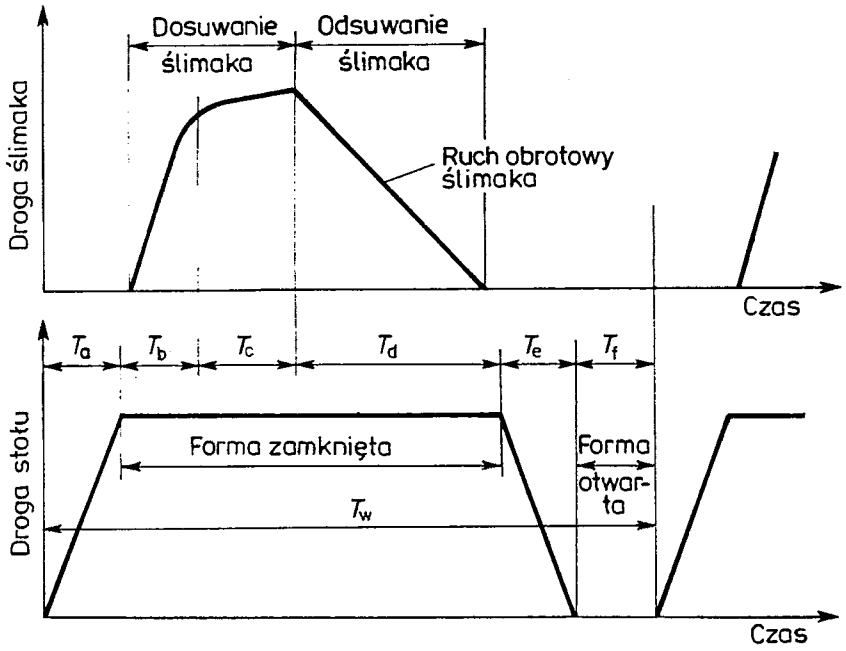
Cykl procesu wtryskiwania: zamykanie – wtrysk – docisk – uplastycznianie – otwieranie – przerwa, pokazano w sposób poglądowy na rys. 3.39, a na rys. 3.40 przedstawiono zależność drogi ślimaka i stołu ruchomego od czasu wtryskiwania.



Rys. 3.38. Schemat procesu wtryskiwania: a) przed rozpoczęciem cyklu wtryskiwania, b) podczas wypełniania gniazda formy wtryskowej, c) po całkowitym wypełnieniu gniazda; oznaczenia w tekście



Rys. 3.39. Poglądowe przedstawienie cyklu wtryskiwania: litery od a do f oznaczają poszczególne elementy składowe cyklu — fazy, zgodnie z tekstem, natomiast oznaczenia od T_a do T_f — odpowiednio czasy poszczególnych faz cyklu

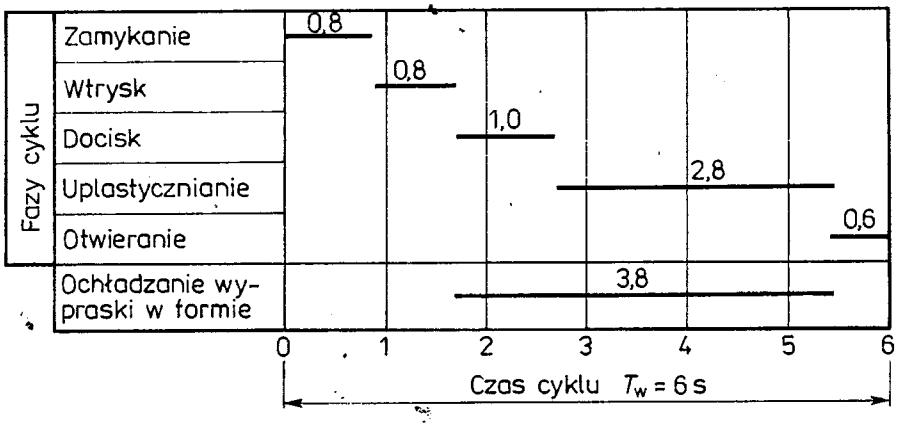


Rys. 3.40. Zależność drogi ślimaka i stołu wtryskarki od czasu w cyklu procesu wtryskiwania: oznaczenia od T_a do T_f odpowiadają czasom poszczególnych faz cyklu, T_w — czas cyklu

Czas cyklu procesu wtryskiwania zależy przede wszystkim od wydajności układu uplastyczniającego wtryskarki, konstrukcji i rozmiarów wypraski oraz rodzaju tworzywa i wynosi na ogół od kilku sekund do kilku minut (rys. 3.41). Czas ten składa się z czasów poszczególnych faz cyklu. Przy oznaczeniach jak na rys. 3.39 i 3.40 można napisać

$$T_w = T_a + T_b + T_c + T_d + T_e + T_f \tag{3.59}$$

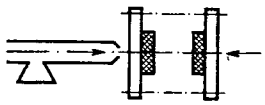
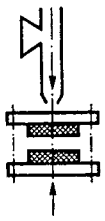
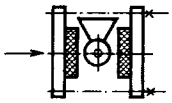
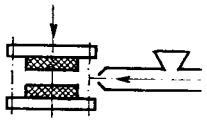
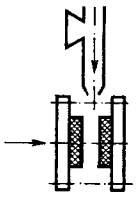
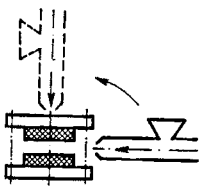
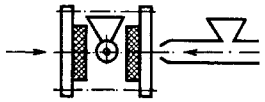
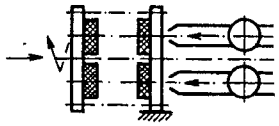
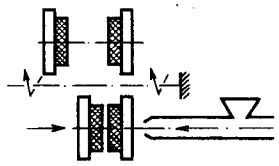
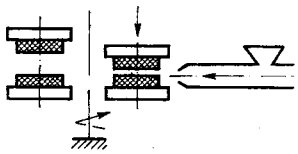
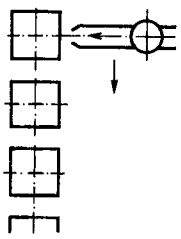
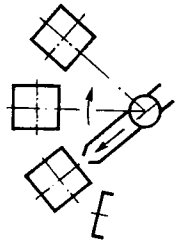
Ze względu na wydajność wtryskarki dąży się do tego, aby czas cyklu był jak najkrótszy. Wiele rozwiązań konstrukcyjnych wtryskarek pozwala na łączenie niektórych ruchów, np. może równocześnie występować zamykanie formy i dosuwanie układu uplastyczniającego, co znacznie skraca czas cyklu.



Rys. 3.41. Czas T_w cyklu procesu wtryskiwania i czasy jego faz na przykładzie wtryskiwania pojemnika z PS o masie 16,3 g z wydajnością 10 sztuk na minutę (cykl bez fazy przerwy) [3.170]

Proces wtryskiwania może być realizowany przy bardzo różnych wzajemnych położeniach układów uplastyczniającego i narzędziowego, co stanowi jedno z kryteriów podziału wtryskarek. Wtryskarki mianowicie można podzielić na (tabl. 3.3):

Podział wtryskarek **Tablica 3.3**

Grupa	Rodzaj wtryskarki	Szkic
Pojedyncze	liniowa	a) 
		b) 
	kątowa	c) 
		d) 
		e) 
	liniowo-kątowa	f) 
Zespolone	z układami uplastyczniającymi nieruchomymi	g) 
	z ruchomymi układami narzędziowymi	h) 
		i) 
		j) 
	z ruchomym układem uplastyczniającym	k) 
		l) 

pojedyncze, gdy zawierają po jednym stałym układzie uplastyczniającym i narzędziowym, oraz zespolone, gdy dowolny z rozważanych układów występuje w liczbie większej niż jeden lub wykonuje określone ruchy nie wynikające z cyklu procesu wtryskiwania.

Wtryskarki pojedyncze dzielą się na [3.209]:

— liniowe; poziome (a) oraz pionowe (b),

— kątowe; poziome — w układzie L (c), poziome (d) oraz pionowe (e),

— liniowo-kątowe; ze zmiennym położeniem jednego lub obu układów (f).

Z kolei *wtryskarki zespolone* dzielą się na:

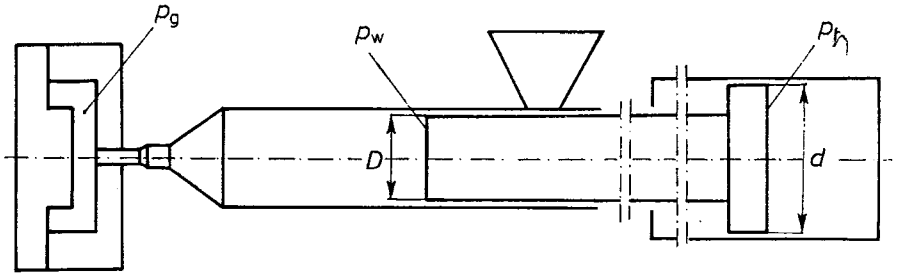
— z wieloma układami uplastyczniającymi nieruchomymi w rozumieniu takim, jak podano poprzednio (g),

— z wieloma ruchomymi układami narzędziowymi; z obrotowym stołem (h), z poziomą osią obrotu układów narzędziowych — rewolwerowe (i) oraz z pionową osią obrotu układów narzędziowych — karuzelowe (j),

— z ruchem układu uplastyczniającego i wieloma układami narzędziowymi, liniowym (k) oraz obrotowym (l). Najbardziej rozpowszechnione są wtryskarki pojedyncze liniowe poziome (jak na rys. 3.37 i 3.38).

Znanych jest wiele specyficznych rozwiązań procesu wtryskiwania w każdym z przypadków podanych w tabl. 3.3. Na przykład ruchomy może być stół wtryskarki położony od strony układu uplastyczniającego [3.114], czyli przeciwnie niż na rys. 3.37 i 3.38, lub oba stoły mogą być nieruchome [3.191], bądź też można w fazie wtrysku nasuwać na formę cewkę elektryczną, co powoduje ukierunkowanie zwłaszcza niektórych napełniaczy w powstającym polu magnetycznym, a więc anizotropię struktury i właściwości wyprasek, tak jak to proponuje firma Tanabe–Kogyo (Japonia). Znane jest również stosowanie przeciwciśnienia, czyli stosowanie w fazie uplastyczniania ciśnienia hydraulicznego w zakresie $5 \div 30$ MPa, co zwiększa oporność przepływu tworzywa w układzie uplastyczniającym i związane z tym generowanie ciepła wskutek tarcia; ma to szczególne znaczenie podczas wtryskiwania gumy [3.172]. W czasie wypełniania gniazda forma może się nieco otwierać, a podczas zestalania lub utwardzania wypraski — zamykać ostatecznie, co stwarza — według firmy Rolinx (Wielka Brytania) — możliwość otrzymywania wyprasek o $2 \div 4$ razy większej powierzchni w stosunku do rozwiązań tradycyjnych [3.118].

Ciśnienie panujące na czole ślimaka lub tłoka wtryskowego p_w nazywa się *ciśnieniem zewnętrznym wtryskiwania* lub krótko *ciśnieniem wtryskiwania* (rys. 3.42). Określa się je znając średnicę ślimaka lub tłoka wtryskowego D, średnicę zewnętrzną tłoka hydraulicznego w układzie dosuwania i odsuwania ślimaka lub tłoka wtryskowego d, ciśnienie w układzie hydraulicznym, zwane krótko *ciśnieniem hydraulicznym* p_h, oraz



Rys. 3.42. Rodzaje ciśnień mające istotny wpływ na proces wtryskiwania; oznaczenia w tekście

siłę tarcia F podczas dosuwania ślimaka (rzut sił na oś układu równa się zeru)

$$p_w \frac{\pi D^2}{4} + F = p_h \frac{\pi d^2}{4} \tag{3.60}$$

skąd

$$p_w = p_h \left(\frac{d}{D}\right)^2 \frac{4F}{\pi D^2} \tag{3.61}$$

Oznaczając $4F/\pi D^2 = \Delta p_F$ otrzymuje się

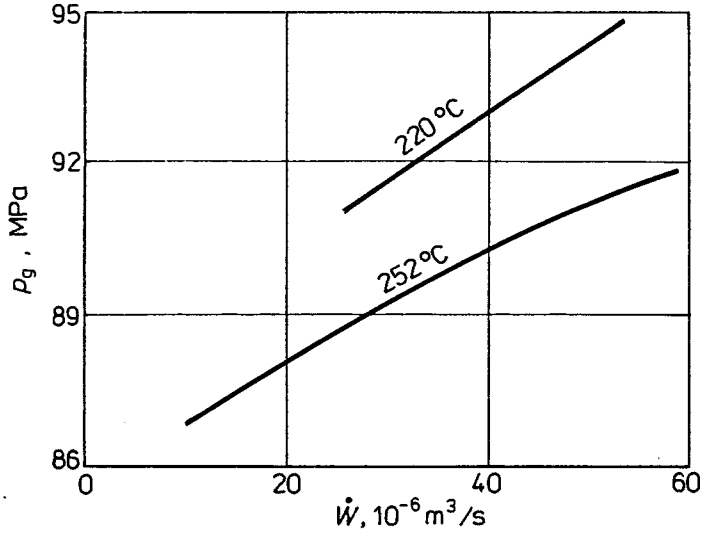
$$p_w = p_h \left(\frac{d}{D}\right)^2 - \Delta p_F \tag{3.62}$$

Wartość spadku ciśnienia spowodowana tarciem Δp_F wynosi w przeciętnie występujących warunkach wtryskiwania około 5 MPa [3.26], natomiast wartość p_w jest zazwyczaj rzędu 60÷200 MPa, ale może być niższa, np. dla PE-LD wynosi 20÷50 MPa, lub wyższa np. dla PCTFE wynosi 280÷290 MPa [3.210], a dla PE-UHMW 290 MPa [3.169].

Ciśnienie panujące w gnieździe formy p_g, nazywane również *ciśnieniem wewnętrznym*, jest wytworzone na skutek ciśnienia wtryskiwania p_w zmniejszonego o spadek ciśnienia w cylindrze Δp_c, w dyszy wtryskowej Δp_d i w kanałach wtryskowych formy Δp_k

$$p_g = p_w - \Delta p_c - \Delta p_d - \Delta p_k \tag{3.63}$$

Wartość ciśnienia wymaganego do wypełnienia gniazda formującego zależy przede wszystkim od temperatury tworzywa wtryskiwanego; ze wzrostem temperatury spada to ciśnienie (rys. 3.43), co tłumaczy się zmniejszaniem lepkości tworzywa, polep-



Rys. 3.43. Zależność ciśnienia p_g wymaganego do wypełnienia gniazda formującego od objętościowego natężenia przepływu $\dot{W}$ stopionego tworzywa w dwu różnych temperaturach [3.26]

szającym proces wypełniania. Zależy również istotnie od natężenia przepływu tworzywa; z powiększaniem się natężenia przepływu ciśnienie rośnie (rys. 3.43), co wynika z tego, że większe natężenie skraca czas wypełniania gniazda, a więc zmniejsza grubość warstwy zestalającego się tworzywa przy powierzchni gniazda w czasie

procesu wypełniania i przez to zwiększa oddziaływanie ciśnienia na powierzchnię gniazda.

Ale ze wzrostem natężenia przepływu powiększają się spadki ciśnienia w dyszy i kanałach wtryskowych, co stwierdzono doświadczalnie [3.26, 3.28] i co wynika z równań Hagena–Poiseuille'a. W celu ułatwienia inżynierskiego wyznaczania spadków ciśnienia w kanałach o przekroju kołowym R. Brzoskowski i W. Szydłowski [3.25, 3.29] opracowali specjalne diagramy. Ich istota polega na porównaniu spadków ciśnienia obliczonych numerycznie według uproszczonej wersji modelu matematycznego ze stratami obliczonymi analitycznie na podstawie uogólnionego równania Hagena–Poiseunille'a. Stosunek tych spadków jest funkcją wielkości bezwymiarowych: liczby Graetza Gz, liczby Brinkmana Br, wykładnika płynięcia n w modelu Ostwalda–de Waele oraz parametru mieszanego

$$\kappa = b(t_0 - t_s) \tag{3.64}$$

gdzie b oznacza parametr równania krzywej lepkości, t_0 — temperaturę tworzywa u wlotu do kanału formy, t_s — temperaturę ścianki kanału. A zatem

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} = \mathrm{f}(\mathrm{Gz}, \mathrm{Br}, n) \tag{3.65}$$

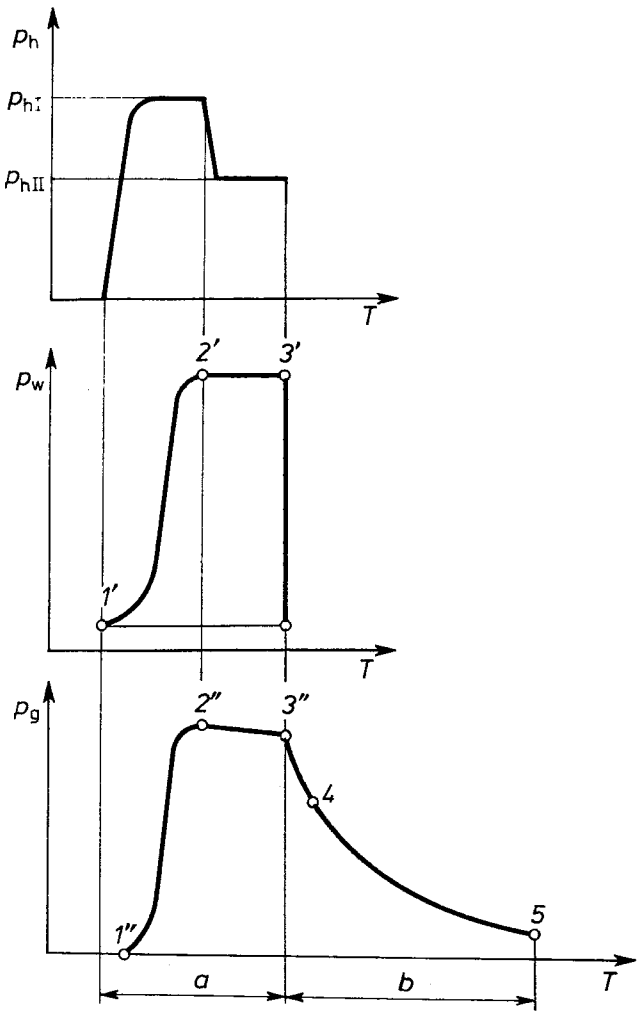
Zazwyczaj

$$p_g = (0{,}3 \div 0{,}7) p_w \tag{3.66}$$

i w sposób istotny wpływa na jakość wyprasek, a znajomość wartości ciśnienia p_g jest niezbędna do wyznaczenia siły zamknięcia formy.

Na rysunku 3.44 przedstawiono przebieg ciśnienia hydraulicznego, ciśnienia wtryskiwania i ciśnienia w gnieździe formującym w zależności od czasu. Przed rozpoczęciem dosuwania ślimaka lub tłoka wtryskowego na ich czole istnieje stosunkowo nieduże ciśnienie, zwane *ciśnieniem dozowania,* wytworzone m.in. dzięki ruchowi obrotowemu ślimaka — punkt (*1'*). Podczas dosuwania ciśnienie szybko wzrasta na czole ślimaka lub tłoka i — z przesunięciem o czas przepływu tworzywa na drodze od czoła do gniazda punkt (*1''*) — w gnieździe, osiągając wartość największą — punkty (*2'*) i (*2''*) — po zakończeniu wypełniania gniazda. Ciśnienie hydrauliczne nastawione na stopień I początkowo rośnie bardzo szybko, ale w obrębie punktów (*2'*) i (*2''*) zostaje przełączone na niższe, stopnia II, utrzymujące się przez cały czas fazy docisku. Odpowiadające temu ciśnienie wtryskiwania nazywa się *ciśnieniem docisku*; utrzymuje się ono prawie stałe, pomimo niedużego dosunięcia ślimaka lub tłoka — punkt (*3'*). W tym czasie ciśnienie w gnieździe nieco spada — punkt (*3''*).

Podczas odsuwania ślimaka lub tłoka ciśnienie wtryskiwania spada nagle, a ciśnienie w gnieździe spada szybko, gdyż obok skurczu pierwotnego zestalania bądź utwardzania następuje nieznaczny ruch powrotny jeszcze nie zestalonego bądź utwardzonego tworzywa. W punkcie (*4*) zachodzi na skutek ochładzania zestalenie lub na skutek polimeryzacji utwardzenie tworzywa w miejscu najwęższym kanałów formy — odpowiadające temu ciśnienie w gnieździe spada dalej, lecz już łagodniej. W punkcie (*5*) wypraska wtryskowa jest na tyle zestalona lub utwardzona, że może być wypchnięta z gniazda. Następuje to przy pewnym ciśnieniu, nazywanym *ciśnieniem*

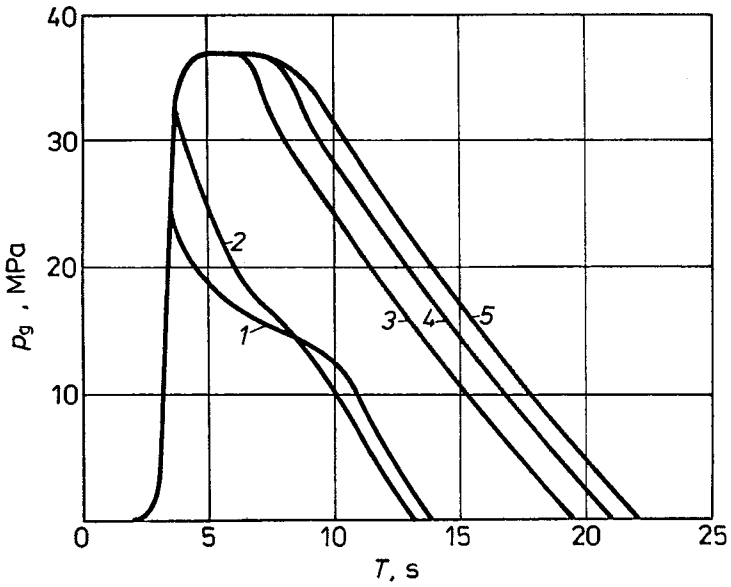


Rys. 3.44. Przebieg ciśnienia hydraulicznego p_h, ciśnienia wtryskiwania p_w i ciśnienia w gnieździe p_g w zależności od czasu T: a — dosuwanie ślimaka, b — odsuwanie ślimaka; pozostałe oznaczenia w tekście

szczątkowym, którego wartość ma bezpośredni wpływ na rodzaj i wartość naprężeń własnych w wyprasce, jak również na różnego rodzaju błędy i anomalie wyprasek.

Zależność $p_g = f(T)$ pokazana na rys. 3.44 jest wyidealizowana i często nosi nazwę *wykresu Gilmore'a–Spencera*. Wykresy rzeczywiste mają zazwyczaj nieco inne proporcje, np. krótszy odcinek (2')–(3') oraz (2'') – (3''), i mniej wyraźnie zaznaczone inne punkty charakterystyczne [3.179].

Istotne znaczenie w procesie wtryskiwania na moment przełączenia ciśnienia hydraulicznego ze stopnia I na stopień II, czyli moment przejścia ciśnienia wtryskiwania w ciśnienie docisku. Przełączenie to może następować w zależności od [3.40]: czasu, drogi, ciśnienia hydraulicznego, ciśnienia wtryskiwania, ciśnienia w gnieździe, prędkości ślimaka lub tłoka i opóźnienia ślimaka lub tłoka. Najczęściej stosowane jest przełączenie w zależności od drogi; gdy ślimak lub tłok dochodzą do określonego punktu swej drogi, przełącznik krzywkowy lub potencjometr daje impuls do przełączenia. W celu zapewnienia całkowitego wypełnienia gniazda, przełączenia dokonuje się na ogół dopiero po osiągnięciu punktu wypełnienia. Na rysunku 3.45 są przedstawione wykresy Gilmore'a–Spencera sporządzone podczas wtryskiwania PP. Krzywa *1* odpowiada procesowi, w którym przełączenie ciśnienia hydraulicznego nastąpiło przed wytworzeniem się wysokiego ciśnienia stopnia I i wypełnienie gniazda odbyło się pod wpływem ciśnienia stopnia II. Krzywa *5* odpowiada z kolei procesowi, w którym



Rys. 3.45. Ustalenie prawidłowego punktu przejścia ciśnienia wtryskiwania w ciśnienie docisku na podstawie ciśnienia w gnieździe przy przełączaniu ciśnienia hydraulicznego w zależności od drogi ślimaka: tworzywo — PP (J-400), forma dwugniazdowa z gniazdami w kształcie prostopadłościanów o wymiarach 110 × 50 × 4 mm, wtryskarka — Formoplast 498/165 [3.40]

wcale nie wystąpiło przełączenie, a więc procesowi wtryskiwania bez fazy docisku. Trzeba zaznaczyć, że w przypadku wtryskiwania niektórych wyprasek, zwykle o mniejszych wymaganiach co do jakości, często proces prowadzi się bez fazy docisku. Punkt przełączenia powinien być tak ustalony, aby otrzymać krzywe w przedziale między krzywą *4* i krzywą *5*.

Ważną wielkością charakteryzującą proces wtryskiwania jest *wydajność uplastyczniania,* którą definiuje się jako największe masowe natężenie przepływu $\dot{G}$ tworzywa przez specjalną dyszę, znajdującą się na końcu układu uplastyczniającego, w otwartą przestrzeń, przy optymalnej prędkości obrotowej ślimaka [3.56, 3.170]. Wartość tę w praktyce wyznacza się dla PS, nazywa *wydajnością nominalną*, oznacza symbolem $\dot{G}_n$ i podaje najczęściej w kg/h. W przypadku innych tworzyw można ją obliczyć w przybliżeniu z zależności

$$\dot{G} = k_{pl}\, \dot{G}_n \tag{3.67}$$

w której k_{pl} oznacza współczynnik względnej zdolności uplastyczniania tworzywa w stosunku do polistyrenu (tabl. 3.4). Wartości współczynnika k_{pl} wynikają jedynie z właściwości cieplnych tworzywa i dlatego różnią się nieco dla gatunków lub odmian tego samego rodzaju tworzywa.

Rzeczywista wydajność uplastyczniania jest mniejsza od wydajności nominalnej $\dot{G}$, określonej w charakterystyce wtryskarki, ponieważ w warunkach produkcyjnych często nie stosuje się optymalnej prędkości obrotowej ślimaka lub zmienia się ciśnienie w układzie uplastyczniającym. Uwzględnia się to wprowadzając do wzoru (3.67) współczynnik k_1 wykorzystania wydajności uplastyczniania. Zatem rzeczywista wydajność uplastyczniania wyraża się wzorem

$$\dot{G}_{rz} = k_1\, k_{pl}\, \dot{G}_n \tag{3.68}$$

Tablica 3.4

Współczynnik k_{pl} względnej zdolności uplastyczniania tworzyw w stosunku do polistyrenu [3.60, 3.170]

Rodzaj tworzywa	Współczynnik k_{pl}
PS, SAN, CAB	1,0
ABS, PMMA, CA	0,85
POM	0,65
PVC twardy	0,75
PVC zmiękczony	1,6÷0,75
PE-LD, PP	0,45
PE-HD, PA	0,40

Wartość współczynnika k_1 wynosi przeciętnie około 0,8. Ale wydajność rzeczywista nie jest osiągana w praktyce produkcyjnej, gdyż w cyklu wtryskiwania są fazy, w których nie zachodzi uplastycznianie, poza tym zależy ona od wielu innych czynników, np. od rozwiązania konstrukcyjnego formy.

Jeżeli masa jednego wtrysku danego tworzywa do określonej formy wynosi m, a czas cyklu wtryskiwania T, to produkcyjną wydajność uplastyczniania określa zależność

$$\dot{G}_{pr} = \frac{m}{T} \tag{3.69}$$

Wydajność produkcyjna uplastyczniania jest zawsze mniejsza od obu wymienionych rodzajów wydajności uplastyczniania

$$\dot{G}_{pr} = k_2 \dot{G} \tag{3.70}$$

gdzie k_2 jest współczynnikiem, którego wartość wynosi zwykle od 0,2 do 0,7.

W tablicy 3.5 przedstawiono zestawienie scharakteryzowanych wielkości na przykładzie wtryskiwania korpusów strzykawek lekarskich jednorazowego użytku z PP (F-601) za pomocą wtryskarki ślimakowej FO 200/80 o nominalnej zdolności uplastyczniania polistyrenu 32 kg/h.

Innymi istotnymi wielkościami charakteryzującymi proces wtryskiwania są objętość i masa wtrysku.

Objętość skokowa V_s wtrysku, zwana również *obliczeniową objętością wtrysku*, jest iloczynem powierzchni przekroju poprzecznego cylindra i całkowitego skoku ślimaka lub tłoka. W fazie wtrysku zachodzi jednak przepływ przeciekowy tworzywa i objętość skokowa nie może być osiągnięta. Wprowadza się więc pojęcie największej objętości V_{max}, jako objętości tworzywa, która podczas całkowitego skoku ślimaka lub tłoka może być wtryśnięta do formy. W temperaturze normalnej zmniejsza się ona dodatkowo o skurcz przetwórczy objętościowy

$$V_{w\,max} = k_3 V_s \tag{3.71}$$

gdzie k_3 oznacza współczynnik strat objętościowych, $k_3 \cong 0{,}85$ dla tworzyw bezpostaciowych, $k_3 = 0{,}75 \div 0{,}85$ dla tworzyw częściowo krystalicznych, jeżeli ślimak ma końcówkę z zaworem zwrotnym [3.56, 3.77, 3.170].

Tablica 3.5

Przykład charakterystyki wydajnościowej uplastyczniania

Pojemność strzykawki, cm^3	Krotność formy	Masa wtrysku m, g	Czas cyklu T, s	Produkcyjna wydajność uplastyczniania, $\dot{G}_{pr}$		Współczynnik k_2
				bezwzględna, kg/h	w stosunku do wydajności nominal., %	
2	20	39,54	19	7,49	52,0	0,52
5	16	52,90	19	10,02	69,2	0,70
10	10	43,23	19	8,19	56,9	0,57
20	8	51,62	22	8,45	58,7	0,59

Największa masa wtrysku M_{max} jest to masa określonego tworzywa, która przy całkowitym skoku ślimaka lub tłoka wtryskowego może być wtryśnięta do formy. Wielkość tę podaje się zwykle w odniesieniu do PS, niekiedy również do innych tworzyw. Wyznacza się ją z zależności

$$M_{w\,max} = k_3 V_s \rho_0 \tag{3.72}$$

w której ρ_0 oznacza gęstość tworzywa w temperaturze normalnej.

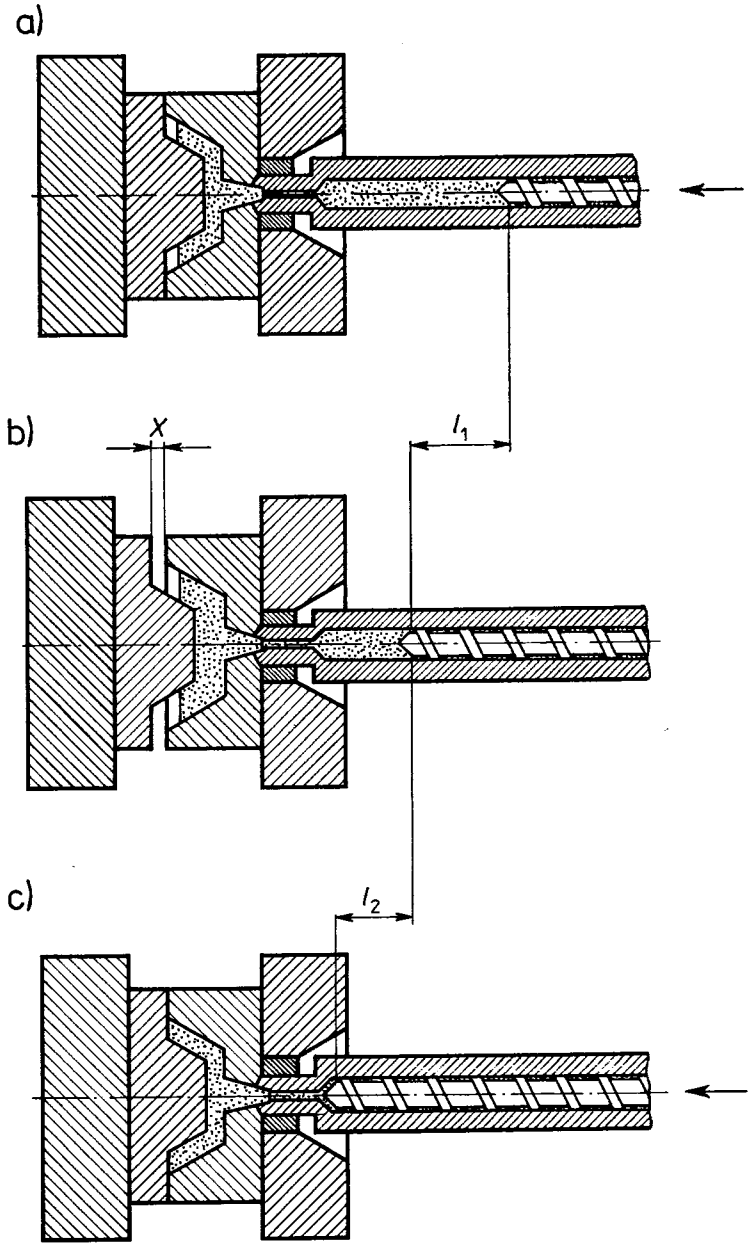
Wtryskiwanie tłokowe jest znacznie mniej wydajne niż wtryskiwanie ślimakowe i często nie zapewnia żądanej wysokiej jakości wyprasek. W związku z tym wtryskiwanie tłokowe jest wypierane przez wtryskiwanie ślimakowe. Obecnie wtryskiwanie tłokowe stosuje się jednak z dobrymi rezultatami w przypadku wyprasek drobnych, którym nie stawia się bardzo wysokich wymagań jakościowych, oraz do tworzyw z napełniaczem krótkowłóknistym, np. w postaci krótkich włókien szklanych, tego rodzaju napełniacz we wtryskarkach ślimakowych ulega bowiem nadmiernemu rozdrobnieniu [3.95], jak również powoduje intensywne zużywanie się układu ślimakowego [3.168].

3.2.2. Wtryskiwanie dokładnościowe

Wtryskiwanie, w którego rezultacie otrzymuje się wypraski wtryskowe o ściśle ustalonych cechach jakościowych, np. tolerancjach wymiaru, kształtu i położenia, nazywa się umownie wtryskiwaniem dokładnościowym. Aby je prowadzić efektywnie, należy przede wszystkim znać zależności między warunkami wtryskiwania oraz wpływ warunków wtryskiwania na właściwości i strukturę wyprasek. Charakteryzuje się ono zawężonymi lub bardzo wąskimi zakresami parametrów wtryskiwania, kontrolą (często szczegółową) cech jakościowych wyprasek oraz średnimi lub dużymi kosztami.

Wtryskiwanie dokładnościowe jest często prowadzone z odgazowaniem tworzywa przetwarzanego. Potrzeba odgazowania tworzywa jest taka sama, jak w przypadku wytłaczania (p. 3.1.1). Wtryskiwanie z odgazowaniem można prowadzić stosując ślimak:

— bez deredukcji objętości kanału, a fazę wtrysku dzielić na trzy etapy (rys. 3.46); 1) wtrysk wstępny podczas przesunięcia ślimaka na drodze l_1, 2) przerwanie ruchu osiowego ślimaka i zmniejszenie ciśnienia hydraulicznego zamykania formy, co

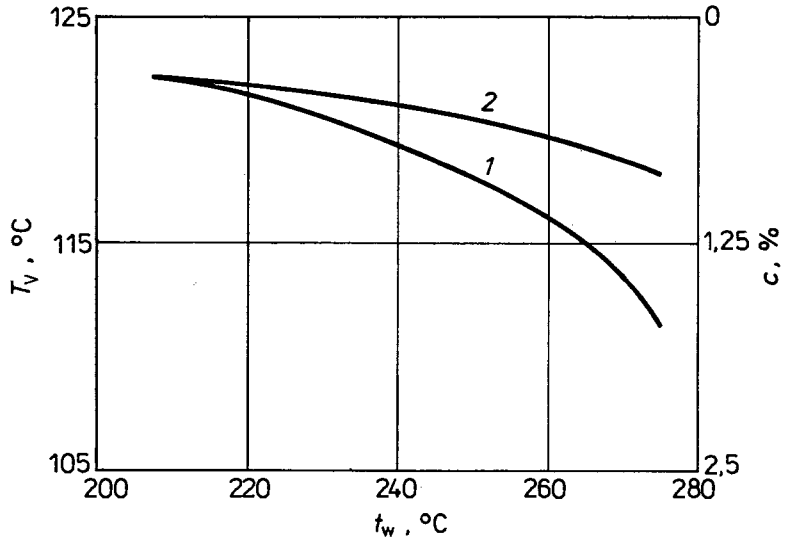


Rys. 3.46. Schemat przebiegu wtryskiwania z odgazowaniem przy zastosowaniu ślimaka bez deredukcji objętości kanału z podziałem fazy wtrysku na następujące etapy: a) wtrysk wstępny, b) uchylenie formy w celu odprowadzenia części lotnych przy przerwaniu osiowego ruchu ślimaka, c) wtrysk zasadniczy

umożliwia na krótki czas uchylenie formy o wartość X umożliwiające odprowadzenie części lotnych, oraz 3) wtrysk zasadniczy przy przesunięciu ślimaka na drodze l_2, przy czym $l_1 + l_2 = L$ (L — skok całkowity ślimaka),

— z deredukcją bądź deredukcjami objętości kanału (rys. 1.5); długość ślimaka ze zmienną i stałą wartością deredukcji — strefa odgazowania — powinna odpowiadać całkowitemu skokowi ślimaka i wynosić np. $5{,}5D$, a przyłożenie podciśnienia w otworze odgazowującym cylindra nie jest wymagane, gdyż w temperaturze wtryskiwania ciśnienie powstających par jest dość duże, np. w przypadku pary wodnej wynosi $1{,}6 \div 8{,}5$ MPa [3.124] (ostatnia uwaga dotyczy również wytłaczania z odgazowaniem).

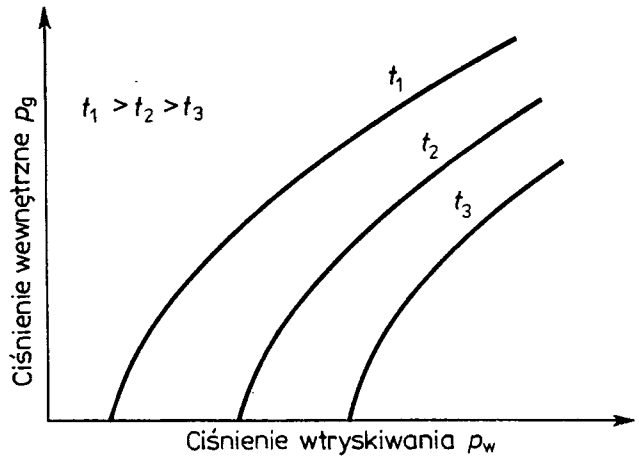
Sposób pierwszy wydłuża fazę wtrysku, a przez to zmniejsza wydajność procesu wtryskiwania, i nie zawsze jest zadowalająco skuteczny. Z tych głównie względów jest wypierany przez sposób drugi, który, poza eliminacją w dużym stopniu podanych niedogodności, powoduje poprawę niektórych właściwości wyprasek (rys. 3.47). W 1987 r. firma Perstorp (Szwecja) zastosowała do wykonywania gniazd specjalne spieki porowate, umożliwiające odprowadzenie gazów.



Rys. 3.47. Zależność odporności na penetrację według Vicata T_v i zawartości c monomeru od temperatury t_w wtryskiwania PMMA [3.170, 3.173]

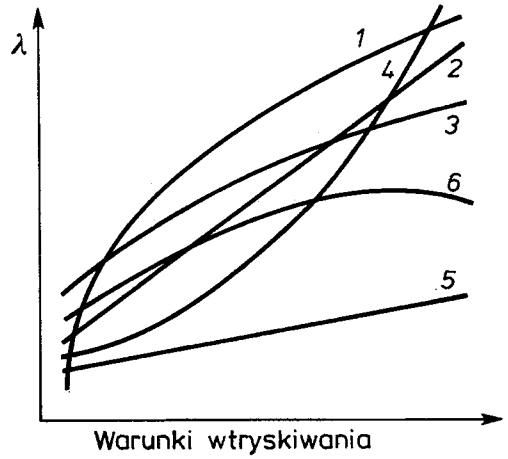
Zależności między warunkami wtryskiwania, spośród których najważniejsze są: temperatura, ciśnienie i czas, należą do bardzo złożonych. Podstawową zależnością, z której wyciąga się wnioski co do zachowania się tworzywa termoplastycznego w czasie przetwórstwa, jest cieplne równanie stanu i jego geometryczna interpretacja — wykres $p-v-t$; problematyka ta będzie szerzej rozwinięta podczas omawiania optymalizacji warunków wtryskiwania (rozdz. 5, p. 5.3.4).

Biorąc pod uwagę wzajemne oddziaływanie temperatury i ciśnienia w czasie procesu wtryskiwania, ustalono zależność ciśnienia w gnieździe formy od ciśnienia wtryskiwania dla różnych wartości temperatury wtryskiwania (rys. 3.48). Zatem ze wzrostem temperatury, przy stałym ciśnieniu wtryskiwania, powiększa się ciśnienie w gnieździe. Ponieważ na ogół jest to niekorzystne, np. ze względu na możliwość uchylenia formy, aby zachować stałe ciśnienie wtryskiwania, należy ze wzrostem



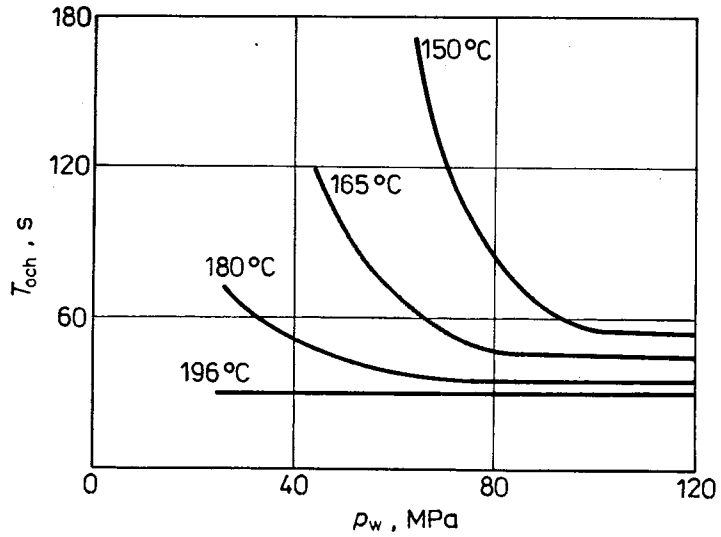
Rys. 3.48. Poglądowa zależność ciśnienia w gnieździe formy (wewnętrznego) od ciśnienia wtryskiwania przy różnej temperaturze wtryskiwania

temperatury obniżyć ciśnienie wtryskiwania. Największy wpływ na zdolność tworzywa do wypełniania gniazda wykazują (rys. 3.49): rozmiar przekroju poprzecznego kanałów przepływowych, prędkość dosuwania ślimaka lub tłoka, ciśnienie wtrys-

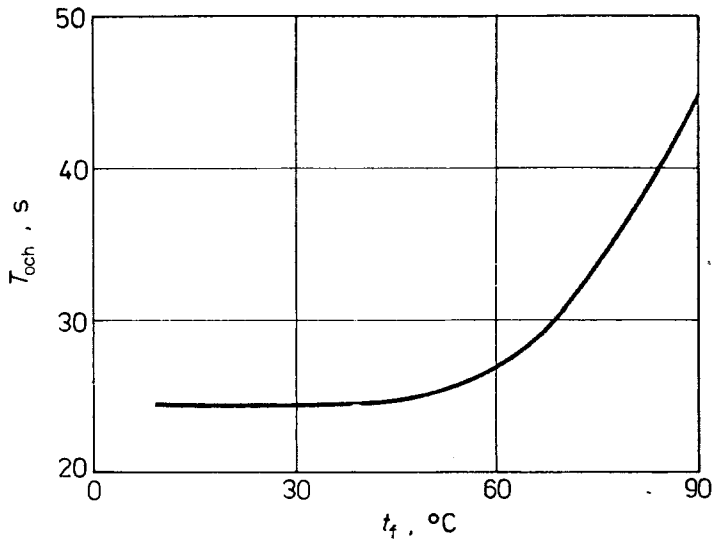


Rys. 3.49. Poglądowa zależność zdolności λ tworzywa do wypełniania gniazda formującego od niektórych warunków wtryskiwania: *1* — rozmiar przekroju poprzecznego kanałów przepływowych, *2* — prędkość dosuwania ślimaka lub tłoka, *3* — ciśnienie wtryskiwania, *4* — wskaźnik szybkości płynięcia, *5* — temperatura formy, *6* — czas cyklu

kiwania i wskaźnik szybkości płynięcia tworzywa. Na rysunku 3.50 pokazano zależność czasu ochładzania wyprasek (łącznie czas docisku i czas uplastyczniania) od ciśnienia wtryskiwania w różnej temperaturze dyszy, z której wynika m.in., że przy względnie wysokiej temperaturze dyszy, a więc małej lepkości tworzywa, ciśnienie wtryskiwania nie wpływa na czas ochładzania. Temperatura formy wtryskowej oddziałuje na czas ochładzania wyprasek dopiero od pewnej swej wartości (rys. 3.51).



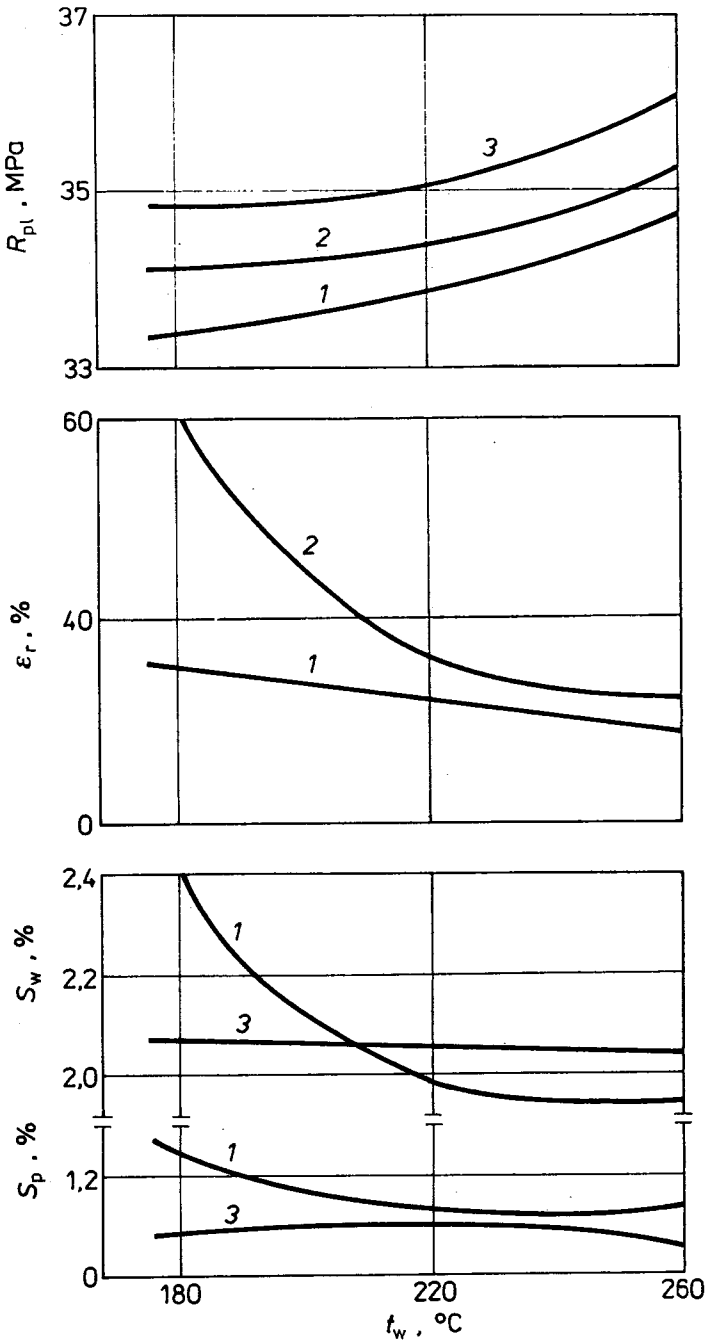
Rys. 3.50. Zależność czasu ochładzania T_{och} wyprasek z PS od ciśnienia wtryskiwania p_w przy różnej temperaturze dyszy [3.170]



Rys. 3.51. Zależność czasu ochładzania T_{och} wyprasek z PS od temperatury t_f formy wtryskowej [3.170]

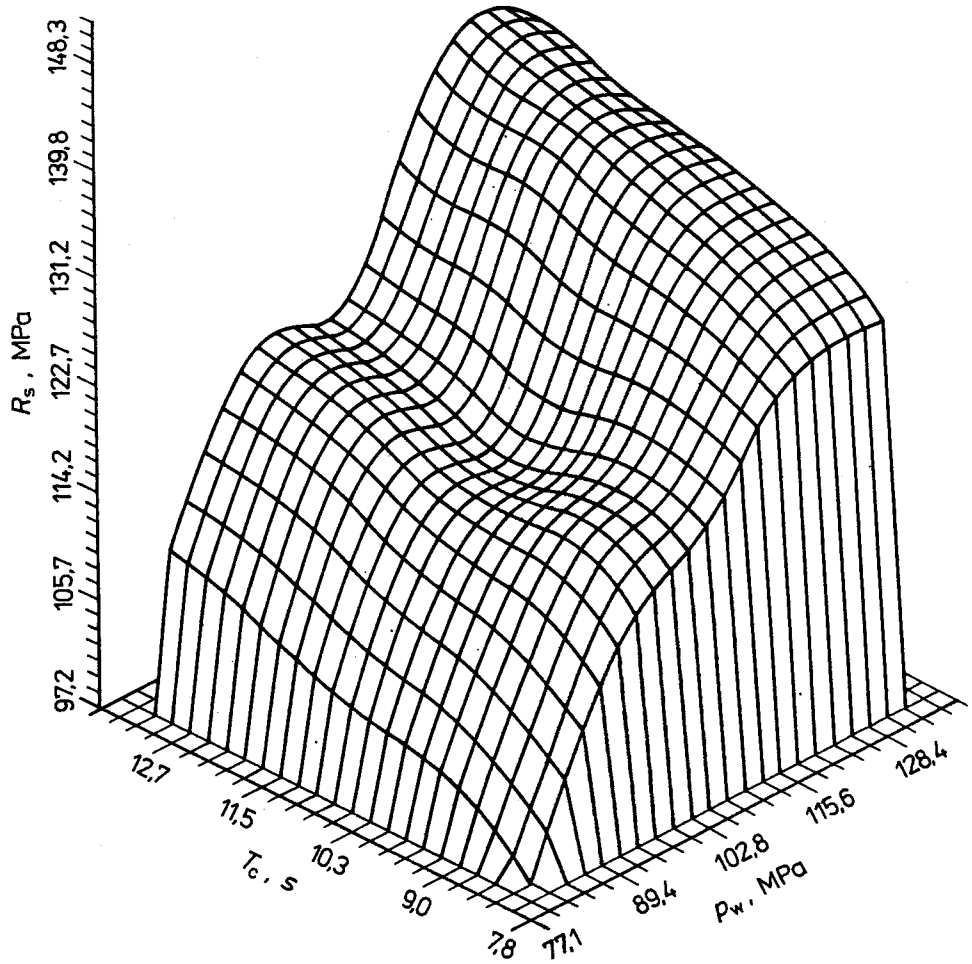
Warunki wtryskiwania wpływają istotnie na właściwości wyprasek, ale mimo dość obszernej literatury na ten temat nadal brak jest ustaleń ogólnych. Na rysunku 3.52 są przedstawione przykładowo: granica plastyczności przy rozciąganiu, wydłużenie względne przy zerwaniu, skurcz pierwotny wzdłużny i poprzeczny, w zależności od temperatury i ciśnienia wtryskiwania wyprasek PP. Wytrzymałość na rozciąganie wyprasek z PE znacznie wzrasta, gdy rośnie ciśnienie w gnieździe formy (10÷43 MPa) [3.45]. Wytrzymałość na ściskanie wyprasek z PA napełnionego zależy istotnie od czasu docisku i ciśnienia wtryskiwania (rys. 3.53). Można dodać, że na orientację molekularną wpływają przede wszystkim (rys. 3.54): rozmiar przekroju poprzecznego kanałów przepływowych, temperatura formy i ciśnienie wtryskiwania.

Wtryskiwanie dokładnościowe przy użyciu form wtryskowych jednogniazdowych nie przedstawia specjalnych trudności, ale formom stawia się m.in. wysokie wymaga-

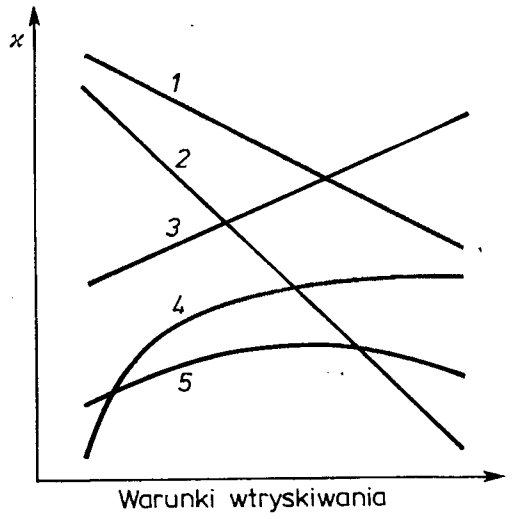


Rys. 3.52. Zależność granicy plastyczności przy rozciąganiu R_{pl}, wydłużenia względnego przy zerwaniu ε_r, skurczu pierwotnego wzdłużnego S_w i poprzecznego S_p od temperatury i ciśnienia wtryskiwania wyprasek PP (J-400): *1* — 80 MPa, *2* — 100 MPa, *3* — 140 MPa; temperatura formy 80°C, czas docisku 30 s [3.48]

nia co do sztywności [3.86]. Jest ono jednak mało wydajne i jeżeli tylko możliwości przetwórcze wtryskarki pozwalają, stosuje się wtryskiwanie dokładnościowe wielogniazdowe. W celu zapewnienia jednakowych warunków wypełniania i zestalania tworzywa we wszystkich gniazdach, co jest nieodzowne do otrzymania wyprasek o określonej, wysokiej jakości, należy przede wszystkim zapewnić jednakową temperaturę gniazd w chwili wypełniania i taką samą jego intensywność oraz jednakowe ciśnienie tworzywa w gniazdach. Pierwszy warunek spełnia się poprzez odpowiednią regulację temperatury formy (bliżej o tym w następnym punkcie). Warunek drugi wymaga takiego doboru elementów geometrycznych i rozmieszczenia kanałów wtryskowych, aby spadki ciśnienia były identyczne. Uzyskuje się to, stosując

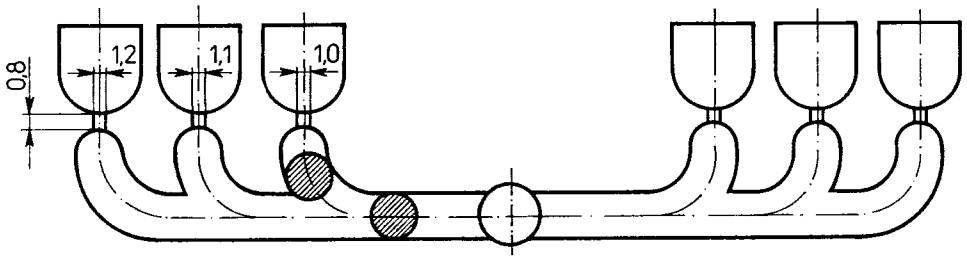


Rys. 3.53. Współzależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie R_c, czasem docisku T_c i ciśnieniem wtryskiwania p_w w przypadku wtryskiwania PA 6 napełnionego krótkim włóknem szklanym (35%), grafitem (1%) i dwusiarczkiem molibdenu (1%); wtryskarka IMI—1300X, forma dwugniazdowa o temperaturze 60 °C



Rys. 3.54. Poglądowa zależność stopnia orientacji molekularnej κ od niektórych warunków wtryskiwania: *1* — temperatura formy, *2* — rozmiar przekroju poprzecznego kanałów przepływowych, *3* — ciśnienie wtryskiwania, *4* — czas docisku, *5* — temperatura cylindra

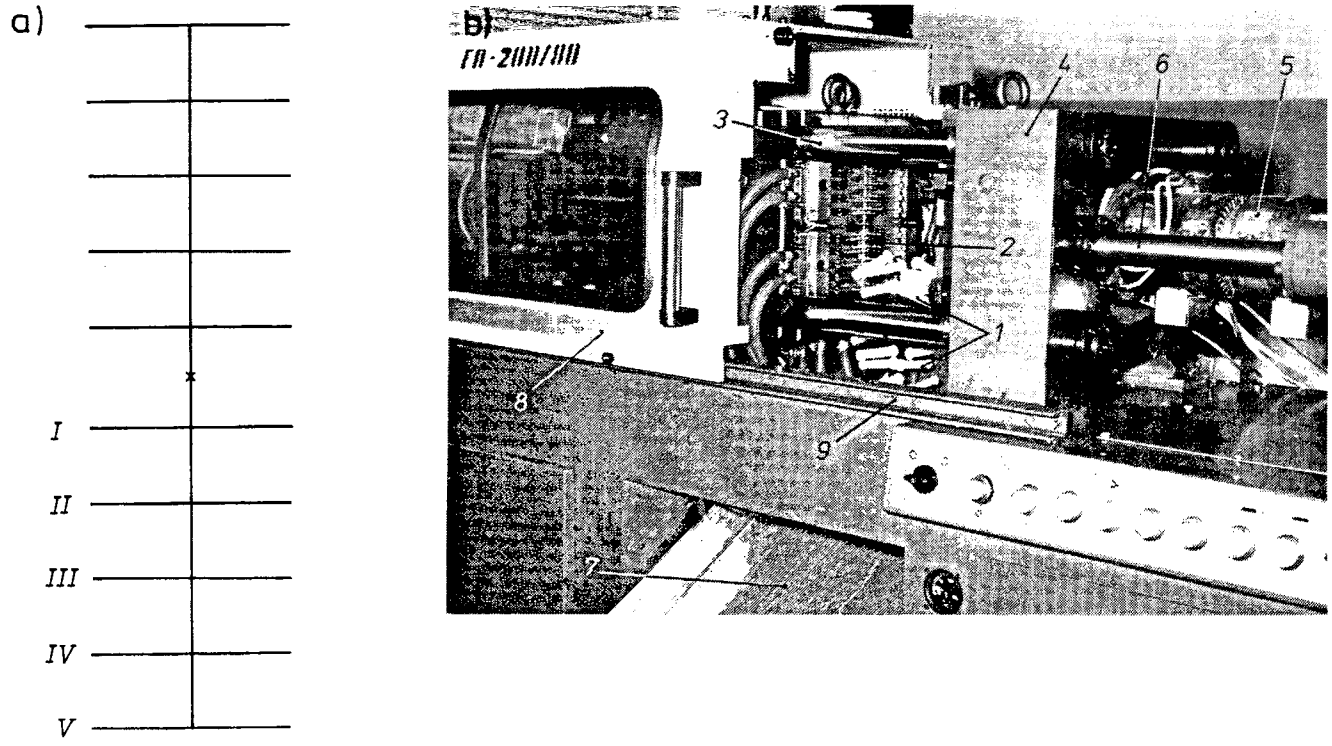
gwiaździsty układ kanałów doprowadzających o jednakowej długości i takim samym przekroju poprzecznym, zakończonych jednakowymi przewężkami. W wielu przypadkach taka forma charakteryzuje się dużymi rozmiarami oraz masą i w stosunku do nich małą krotnością, co pogarsza wskaźniki techniczno-ekonomiczne procesu wtryskiwania i zwiększa koszt wykonania i użytkowania formy. Często więc odstępuje się od tej zasady, stosując formy pozbawione wymienionych wad, lecz o różnej długości drogi przepływu tworzywa do poszczególnych gniazd. Przyjmując ze względów wykonawczych, że przekrój poprzeczny kanałów doprowadzających jest identyczny, różne są spadki ciśnienia na tych drogach — mniejsze na najkrótszej drodze, a więc do gniazd położonych bliżej centralnego kanału wtryskowego, a większe na drodze dłuższej, zatem do gniazd położonych dalej od centralnego kanału wtryskowego. Praktycznie powoduje się, aby spadki ciśnienia były jednakowe, stosując przewężki o jednakowej długości, ale różnej szerokości — przewężki bliżej kanału centralnego są węższe, natomiast oddalone od niego szersze (rys. 3.55).



Rys. 3.55. Przykład przewężek o zróżnicowanej szerokości i jednakowej długości [3.170]

Wtryskiwanie dokładnościowe wielogniazdowe można również prowadzić, stosując formę o różnej długości drogi przepływu tworzywa do poszczególnych gniazd i jednakowych przewężkach, co obniża koszty wykonania formy, ale niezbędny jest wówczas specjalny dobór warunków wtryskiwania. Było ono szczegółowo badane przez R. Sikorę i J. Kloca [3.164, 3.165]. Na rysunku 3.56 pokazano przykładowe rozmieszczenie kanałów doprowadzających i gniazd w takiej formie oraz fragment wtryskarki w chwili wypychania wyprasek. Regułą jest to, że zakres zalecanych warunków wtryskiwania jest bardzo wąski w stosunku do ogólnie przyjmowanego w literaturze zakresu tych warunków (rozdz. 5, p. 5.3.4). Wpływ zmian nominalnych parametrów wtryskiwania, tzn. nastawianych na wtryskarce, na błąd wymiaru i kształtu wyprasek nie jest jednakowy dla wszystkich gniazd — zmiana parametrów wtryskiwania w przypadku gniazd z najkrótszą drogą przepływu powoduje większy błąd niż taka sama zmiana parametrów w przypadku gniazd z najdłuższą drogą przepływu. Wypraski z poszczególnych gniazd różnią się skurczem (tabl. 3.6), a więc i właściwościami. Jeżeli mieści się to w przyjętych tolerancjach, proces wtryskiwania uznaje się za prawidłowy.

Problematyka kontroli cech jakościowych wyprasek jest bardzo rozległa. Wiadomo, że jakość nie jest wielkością bezpośrednio mierzalną, a jej ocenę przeprowadza się za



Rys. 3.56. Schemat (a) rozmieszczenia kanałów doprowadzających i gniazd formujących w formie dwudziestogniazdowej do tłoczysk strzykawek lekarskich jednorazowego użytku z PE-HD o pojemności 5 cm^3 (liczby od *I* do *V* oznaczają kanały i gniazda będące przedmiotem analizy) oraz fragment (b) wtryskarki ślimakowej w chwili wypychania wyprasek z tej formy: *1* — wypraski, *2* — wypychacze w pozycji wysuniętej, *3* — prowadnice stołu, *4* — stół nieruchomy, *5* — grzejniki elektryczne zamocowane na cylindrze układu uplastyczniającego, *6* — tłoczysko siłownika hydraulicznego do przesuwania układu uplastyczniającego, *7* — rynna do odbierania wyprasek, *8* — osłona przesuwana, *9* — prowadnice osłony

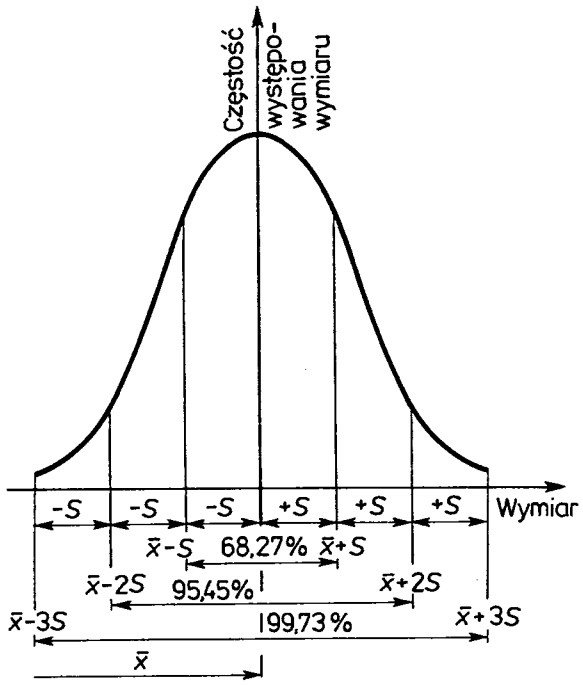
pomocą umownie przyjętych kryteriów jakości. W odniesieniu do wyprasek wtryskowych (podobnie jak do większości wytworów) dzielą się one na : geometryczne, organoleptyczne, wytrzymałościowe, reologiczne, technologiczne, materiałowe i tribologiczne [3.163]. Szczególne znaczenie przypisuje się na ogół kryteriom geometrycznym i materiałowym [3.70, 3.162].

Tablica 3.6

Zmierzone elementy geometryczne kanałów doprowadzających i gniazd układu jak na rys. 3.56 oraz wyprasek z PE-HD (Stamylan); wtryskarka ślimakowa FO 200/80

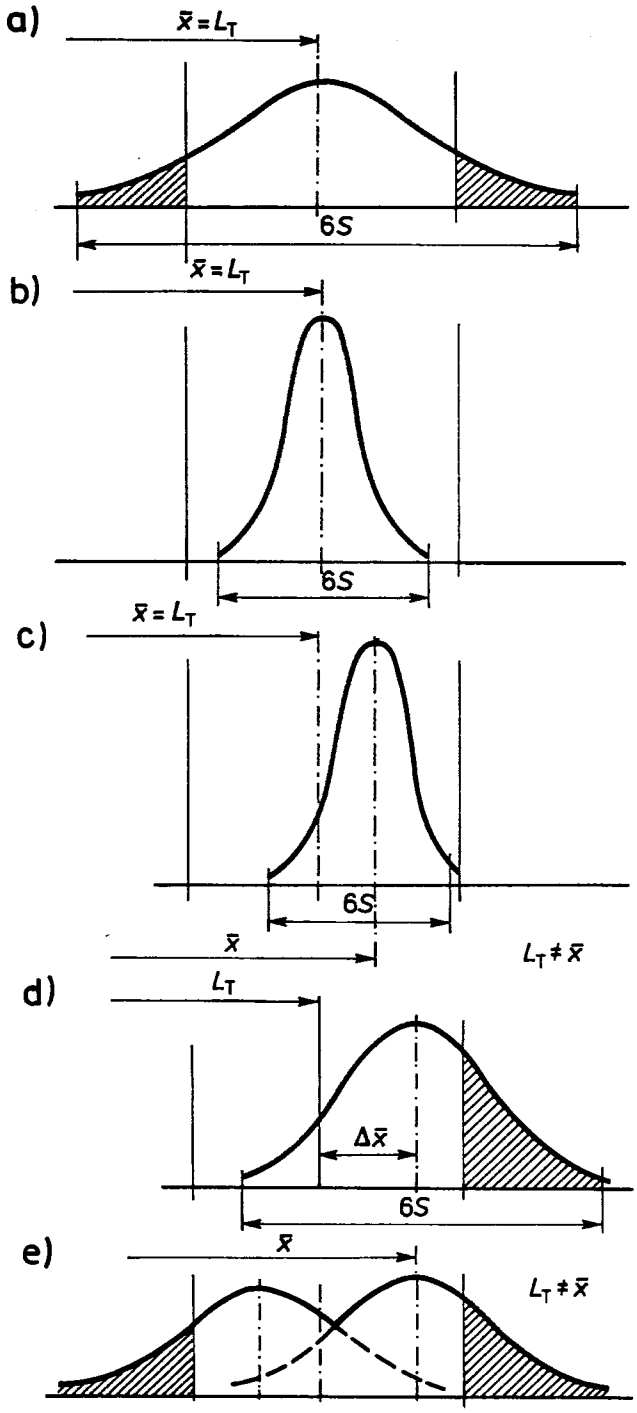
Symbol gniazda według rys. 3.56	Długość drogi przepływu, mm	Średnica przewężki, mm	Wymiar gniazda, mm	Wymiar wypraski, mm	Skurcz pierwotny poprzeczny, %
I	90	1,019	13,113	12,806	2,341
II	110	1,047	13,104	12,774	2,518
III	130	1,033	13,107	12,765	2,607
IV	150	1,002	13,101	12,750	2,682
V	170	1,049	13,086	12,726	2,754

Kryteria geometryczne oceny jakości wyprasek łączą się z zagadnieniami dokładności wytworów, przedstawionymi w rozdz. 5, p. 5.2. Oddzielnego omówienia wymaga rozkład danego wymiaru zmierzonego wyprasek, pochodzących z tego samego gniazda, przy ustalonych warunkach wtryskiwania. Zachodzi on — podobnie jak w większości procesów technologicznych — z dużym przybliżeniem zgodnie z krzywą rozkładu normalnego Gaussa (rys. 3.57). Krzywa ta jest nieograniczona — jej końce dążą asymptotycznie do osi odciętych, ale do celów praktycznych ogranicza się krzywą do przedziału $\pm 3S$ (S — odchylenie standardowe), zawiera on bowiem 99,73% wyprasek. Oznacza to, że na 1000 wyprasek 3 wypraski mogą jeszcze znajdować się poza przedziałem. Spotyka się również w warunkach produkcyjnych inne rozkłady danego wymiaru zmierzonego wyprasek, niektóre z nich są zestawione na rys. 3.58.



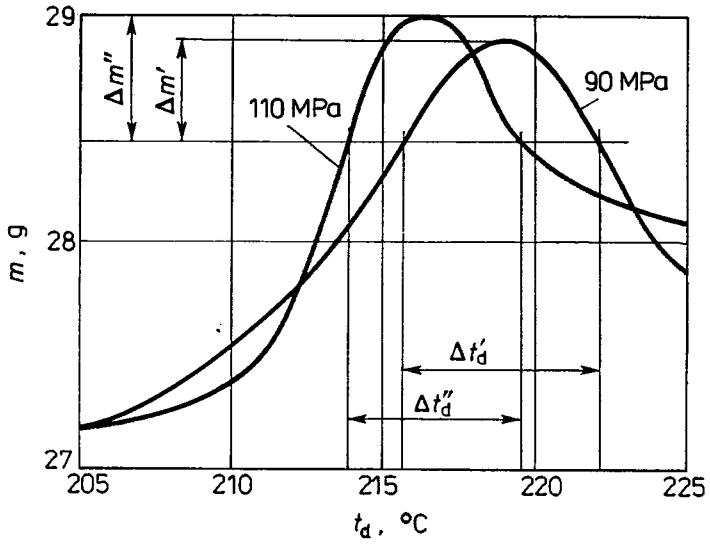
Rys. 3.57. Rozkład danego wymiaru zmierzonego wyprasek, pochodzących z tego samego gniazda, według krzywej Gaussa: $\bar{x}$ — wymiar średni, S — odchylenie standardowe

Kryteria materiałowe oceny jakości wyprasek dzielą się na strukturalne i masowe. *Kryterium strukturalne* [3.48, 3.82, 3.158] jest stosowane głównie w odniesieniu do tworzyw termoplastycznych częściowo krystalicznych i dotyczy oceny struktury wyprasek w porównaniu ze strukturą przyjętą jako wzorcową. Wymaga ono opanowania techniki przygotowania próbek oraz badań mikroskopowych i z tego powodu raczej nie stosuje się go w warunkach produkcyjnych. Stosowanie *kryterium masowego* polega na wyznaczeniu zależności między masą wyprasek pochodzących z tego samego gniazda a warunkami wtryskiwania i jej analizie (rys. 3.59). Stwierdzono [3.74, 3.155, 3.163], że wypraski z PA, PE, POM i PS o największej masie charakteryzują się największą wytrzymałością i udarnością. Zauważono również, że wypraski o największej masie mają strukturę bardzo zbliżoną do przyjętej za



Rys. 3.58. Ważniejsze krzywe rozkładu wymiaru zmierzonego wyprasek, poza krzywą rozkładu normalnego Gaussa, występujące w warunkach produkcyjnych: a) rozkład rozproszony, b) rozkład skupiony (najbardziej zalecany), c) rozkład skupiony przesunięty, d) rozkład rozproszony i przesunięty, e) rozkład nakładający się; $\bar{x}$ — wymiar średni, L_T — dany wymiar technologiczny wypraski [3.22, 3.210]

wzorcową. Analiza wspomnianych zależności sprowadza się do ustalenia dopuszczalnej jednokierunkowej odchyłki Δm masy od największej (górnej) masy granicznej, czyli wskazania najmniejszej (dolnej) masy granicznej, i związania tej odchyłki z odchyłką wybranego parametru wtryskiwania; w przykładzie na rys. 3.59 z odchyłką temperatury dyszy Δt_d. Kryterium to może być z powodzeniem stosowane w warunkach produkcyjnych, gdyż wymaga tylko używania dokładnej wagi, którą można usytuować przy stanowisku technologicznym wtryskiwania.



Rys. 3.59. Zależność masy m wyprasek z PP (J-400) od temperatury t_d dyszy przy dwu różnych ciśnieniach wtryskiwania; czas cyklu 30÷50 s, wtryskarka FO 200/80, forma jednogniazdowa o temperaturze 50°C

3.2.3. Układ narzędziowy

Układ narzędziowy składa się z zespołu narzędzia, obejmującego formę wtryskową i oba stoły wtryskarki, oraz z zespołu zamykająco-otwierającego, obejmującego prowadnice, dźwignie, siłowniki hydrauliczne i płytę oporową.

Forma wtryskowa składa się w zasadzie z dwóch podzespołów: podzespołu mocowanego do ruchomego stołu wtryskarki, zwanego podzespołem ruchomym, i podzespołu mocowanego do nieruchomego stołu wtryskarki, zwanego podzespołem nieruchomym. Podzespół ruchomy wykonuje ruch postępowo-zwrotny, wymuszony przez prowadnice; nosi on nazwę ruchu głównego formy. W formie występują również ruchy inne, pomocnicze, np. wykręcanie segmentów. Podzespoły formy tworzą następujące części: gniazdo lub gniazda formujące, układ przepływowy (wlewowy), układ chłodzenia lub grzania, układ uwalniania i wypychania wypraski (lub wyprasek), a także wlewka, obudowa i elementy ustalające oraz prowadzące, jak również układy uzupełniające [3.138]. Forma, która ma jedno gniazdo, nazywa się jednogniazdową (jednokrotną), a forma z więcej niż jednym gniazdem — wielogniazdową (wielokrotną). Pierwsza forma wielogniazdowa została opatentowana przez J.W. Hyatta już w 1878 r. W Polsce konstrukcję form wtryskowych wyczerpująco przedstawili H. Zawistowski i D. Frenkler w pierwszej i dotychczas jedynej książce z tego zakresu w języku polskim [3.210]. Na rysunku 3.60 pokazano przykładowo klasyczną niezłożoną formę wtryskową.

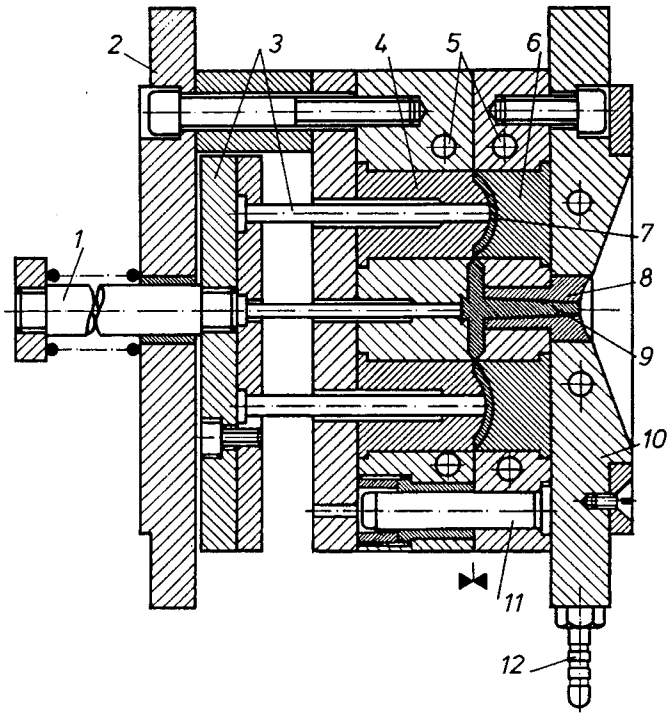
Układ przepływowy formy wtryskowej ma następujące *kanały wtryskowe* (rys. 3.61):

— *kanał centralny* (wlewowy), stożkowy, współosiowy z dyszą wtryskarki,

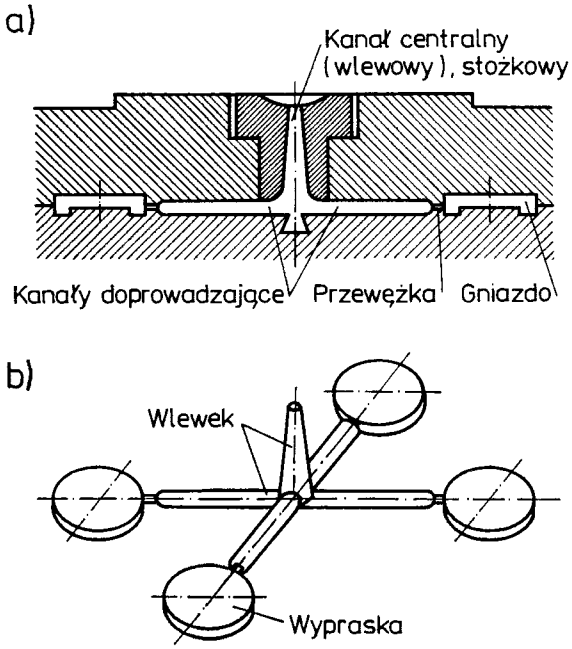
— *kanał doprowadzający*, łączący kanał wtryskowy z gniazdem formującym formy przez przewężkę,

— *przewężkę*, stanowiącą zwężone ujście kanału doprowadzajacego do gniazda.

Znane są dwa zasadnicze sposoby wypełniania gniazda formującego: wypełnianie proste (źródłowe) i wypełnianie strumieniowe (rys. 3.62). *Wypełnianie proste* zachodzi



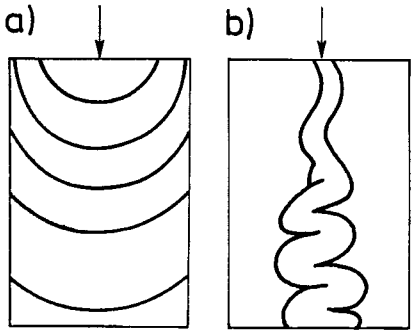
Rys. 3.60. Forma wtryskowa klasyczna do tworzyw termoplastycznych: *1* — trzpień wypychający, *2* — płyta mocująca podzespołu ruchomego, *3* — płyta i wypychacze układu uwalniania i wypychania wypraski, *4* — stempel, *5* — kanały chłodzące, *6* — matryca, *7* — wypraska, *8* — tuleja wtryskowa, *9* — wlewek, *10* — płyta podzespołu nieruchomego, *11* — słup prowadzący, *12* — dopływ i odpływ wody chłodzącej



Rys. 3.61. Istota układu przepływowego formy: a) przekrój przez kanały przepływowe, b) wygląd przedmiotu po wypchnięciu z formy

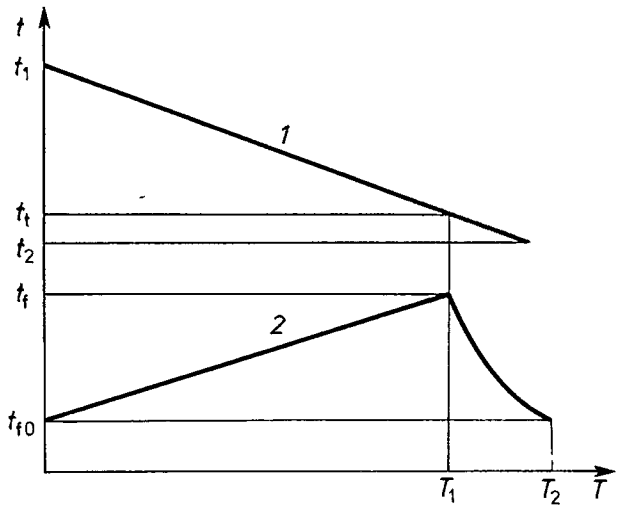
podczas małych i średnich szybkości wtrysku oraz charakteryzuje się tym, że tworzywo wpływa łagodnie do gniazda, wypełniając je, począwszy od przewężki, w sposób uporządkowany. Odkształcenia, jakich doznaje tworzywo, są wynikiem zarówno ścinania, jak i rozciągania w kierunku obwodowym. *Wypełnianie strumieniowe* występuje przy dużych prędkościach wtrysku i polega na tym, że tworzywo wpływa do

Rys. 3.62. Wypełnianie gniazda formy wtryskowej:
a) proste, b) strumieniowe



gniazda w postaci strumienia przemieszczającego się gwałtownie aż do chwili napotkania przeszkody. Po uderzeniu czoła strumienia w przeszkodę tworzywo może nadal wpływać do gniazda w postaci strumienia, który zaczyna zwijać się począwszy od przeszkody w kierunku ku przewężce bądź może zacząć wypełniać gniazdo regularnie od przewężki. Wypełnianie strumieniowe występuje wówczas, gdy średnica strumienia po wyjściu z przewężki jest mniejsza od odległości między ściankami gniazda. Podczas wypełniania strumieniowego poważny problem stanowią linie łączenia strumieni w wyprasce. Analityczne rozwiązanie zagadnienia wypełniania gniazda wymaga opracowania modelu matematycznego procesu i symulacji komputerowej [3.96, 3.194, 3.195]. Proces wypełniania gniazda jest bardziej efektywny przy drganiach tworzywa wpływającego [3.198].

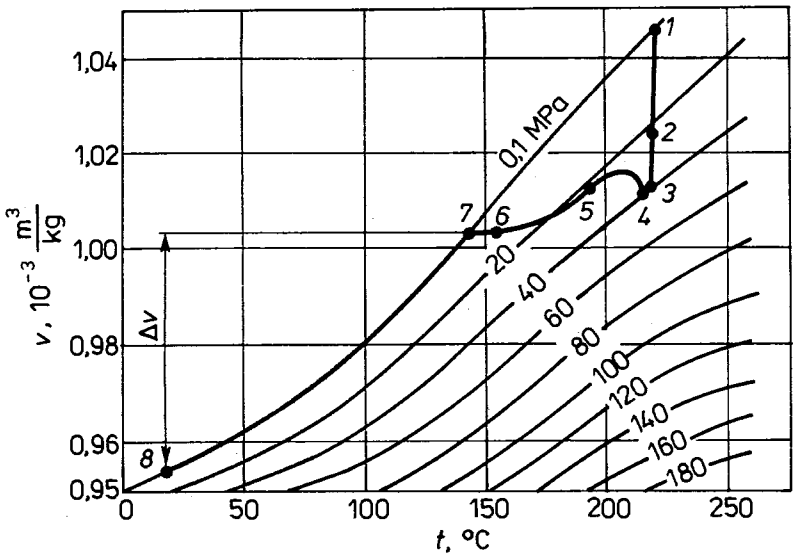
Procesy zachodzące w formie wtryskowej są, obok procesu uplastyczniania, odpowiedzialne za wydajność wtryskiwania. Tworzywa termoplastczne wtryskuje się do formy o zadanej temperaturze t_{f0} zależnej od rodzaju tworzywa, ale niższej od temperatury zestalania (na ogół $30 < t_{f0} < 120°C$). Wpływające do formy tworzywo o temperaturze t_1 powoduje ogrzewanie się formy. Forma osiąga najwyższą temperaturę t_f, gdy wypraska zestala się w temperaturze t_t w czasie T_1. Następnie temperatura formy spada wskutek chłodzenia i w czasie T_2 osiąga temperaturę t_{f0}. Wypraska zostaje wypchnięta z gniazda w temperaturze t_2, przy czym $t_f < t_2 < t_t$. Zmiany temperatury tworzywa i formy pokazano na rys. 3.63. Temperatura formy jest



Rys. 3.63. Zmiany temperatury t tworzywa (*1*) i formy wtryskowej (*2*) w funkcji czasu T; pozostałe oznaczenia w tekście

regulowana samoistnie lub, coraz częściej, a w przypadku wtryskiwania dokładnościowego koniecznie, za pomocą specjalnych regulatorów, zazwyczaj poprzez regulację temperatury czynnika przepływającego przez układ chłodząco-grzejny. Najczęściej czynnikiem tym jest woda, glikol lub olej, ale stosuje się również ciekły azot, co skraca czas chłodzenia, a przez to czas cyklu wtryskiwania [3.122]. W przypadku tworzyw utwardzalnych forma jest tylko ogrzewana, najczęściej przez zastosowanie grzejników elektrycznych trzpieniowych. Temperatura formy powinna być równa temperaturze polimeryzacji, na ogół zawiera się w granicach $150 \div 180°C$. Zatem wypraski w chwili wypchnięcia z gniazd są gorące.

Do analizy procesów zachodzących w gnieździe formującym wykorzystuje się wykres $p-v-t$. Na rysunku 3.64 pokazano przykładowo taki wykres dla PS, zaznaczając przebieg wypełniania gniazda i ochładzania warstwy wypraski, której temperatura została przyjęta jako wartość średnia w przekroju wypraski. Aby zmniejszyć różnicę objętości właściwej Δv podczas ochładzania i związany z tym skurcz, a w konsekwencji poprawić jakość wypraski, należy przemieścić punkt (7) na rysunku w kierunku niższej temperatury. Przeprowadza się to korzystnie poprzez podwyższenie ciśnienia w gnieździe.



Rys. 3.64. Przebieg wypełniania gniazda i ochładzania warstwy wypraski na wykresie p–v–t dla polistyrenu: *1–2* — wypełnianie gniazda, *2–3* — sprężenie w gnieździe ciekłego tworzywa, *3* — maksimum ciśnienia, *4* — przejście ciśnienia wtryskiwania w ciśnienie docisku, *4–5* — spadek ciśnienia po przełączeniu, odpływ tworzywa w kierunku ślimaka, *5* — osiągnięcie poziomu ciśnienia docisku, *5–6* — spadek ciśnienia w rezultacie postępującego ochładzania, *6* — zestalenie tworzywa, zakończenie dopływu tworzywa do gniazda, *6–7* — izochoryczny spadek ciśnienia, *7* — osiągnięcie ciśnienia atmosferycznego, początek skurczu, *7–8* — ochładzania izobaryczne, *8* — osiągnięcie stanu normalnego [3.108, 3.171]

Do formy wtryskowej jest doprowadzany strumień ciepła $\dot{Q}_T$ (do wnętrza przez wtryskiwane tworzywo), a odprowadzany lub doprowadzany strumień ciepła $\dot{Q}_{Ch\text{-}G}$ przez układ chłodząco-grzejny oraz również odprowadzany lub doprowadzany strumień ciepła $\dot{Q}_O$ z otoczenia formy. Oznaczając strumień ciepła pozostający w wyprasce w chwili opuszczenia gniazda przez $\dot{Q}_W$, bilans strumieni ciepła formy można przedstawić następująco (rys. 3.65):

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_W \pm \dot{Q}_{Ch\text{-}G} \pm \dot{Q}_O \tag{3.73}$$

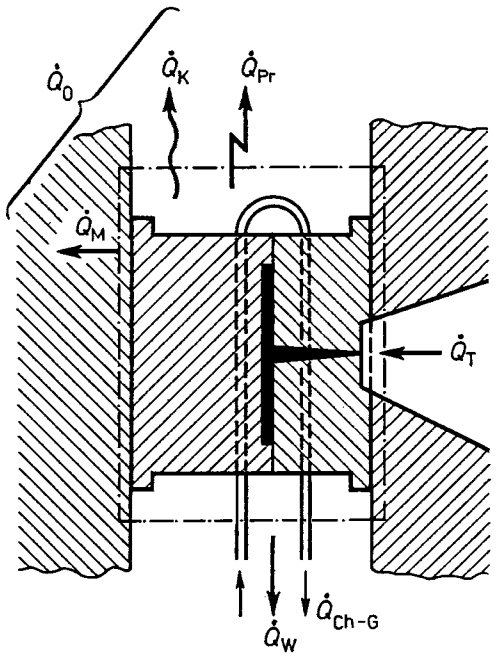
przy czym

$$\dot{Q}_O = \dot{Q}_{Pr} + \dot{Q}_M + \dot{Q}_K \tag{3.74}$$

gdzie $\dot{Q}_{Pr}$ oznacza strumień ciepła przeniesiony przez promieniowanie, $\dot{Q}_M$ — strumień przeniesiony przez przewodzenie do lub od stołów wtryskarki, $\dot{Q}_K$ — przeniesiony przez konwekcję do bądź z otoczenia. Zatem wzór (3.73) przybiera postać

$$\dot{Q}_T = \dot{Q}_W \pm \dot{Q}_{Ch\text{-}G} \pm \dot{Q}_{Pr} \pm \dot{Q}_M \pm \dot{Q}_K \tag{3.75}$$

Wyznaczenie wielkości podanych we wzorach jest niekiedy dość złożone, ale można je — przy określonych uproszczeniach — znaleźć w literaturze [3.109, 3.210].



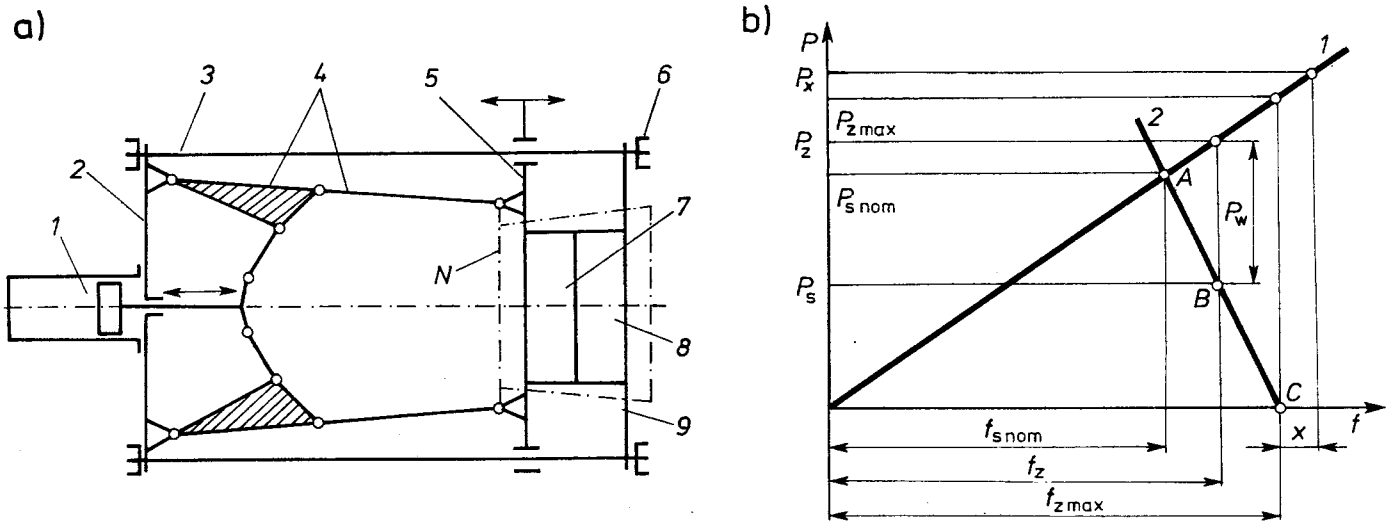
Rys. 3.65. Bilans strumieni ciepła formy wtryskowej; oznaczenia w tekście

Tworzywo zestalone lub utwardzone w kanałach wtryskowych nosi nazwę *wlewka* (rys. 3.61b). Wlewek jest w istocie odpadem technologicznym.

Udział procentowy masy wlewka w stosunku do łącznej masy wypraski i wlewka zależy głównie od masy wypraski i waha się w granicach od kilku do kilkunastu procent dla wyprasek o dużej masie do 70÷80% i więcej dla wyprasek o małej masie z formy wielogniazdowej — jest to zatem odpad znaczny. Odpad ten można prawie całkowicie wyeliminować poprzez niedopuszczenie do zestalenia lub utwardzenia tworzywa w kanałach wtryskowych. Osiąga się to w przypadku tworzyw termoplastycznych dzięki izolowaniu kanałów bądź ich ogrzewaniu. Sposób pierwszy polega głównie na powiększeniu przekroju poprzecznego kanału do tego stopnia, że tworzywo w środku kanałów pozostaje stale ciekłe, co osiąga się wskutek złej przewodności cieplnej tworzyw. Natomiast sposób drugi polega na ogrzaniu kanałów grzejnikami elektrycznymi w taki sposób, aby zapewnić temperaturę potrzebną do utrzymania tworzywa w stanie ciekłym. Obecnie stosowany jest prawie wyłącznie sposób drugi, przy czym znanych jest wiele rozwiązań tego rodzaju form [3.210], które

nazywają się *formami z kanałami grzanymi*. Są one jednak dość złożone oraz wymagają specyficznych materiałów i grzejników, jak również warunków eksploatacji — a więc są drogie — co stanowi główną przyczynę ich jeszcze stosunkowo małego rozpowszechnienia. W przypadku tworzyw utwardzalnych gniazdo ogrzewa się do temperatury niezbędnej do utwardzenia tworzywa, natomiast kanały utrzymuje się w temperaturze niższej (70÷115°C). W ten sposób tworzywo wypełniające kanały może być wykorzystane do następnego cyklu wtryskiwania. Oprócz wartości temperatury istotny jest również czas jej oddziaływania. Formy takie noszą często nazwę *form z kanałami zimnymi*. I w tym przypadku znanych jest wiele rozwiązań konstrukcyjnych form [3.189].

Zespoły zamykająco-otwierające dzielą się głównie na dźwigniowe, dźwigniowo-hydrauliczne i hydrauliczne. Nazwa układu narzędziowego jest taka, jak nazwa zastosowanego w nim zespołu zamykająco-otwierającego. Układom narzędzia poświęca się poważne prace naukowe [3.121] i techniczne [3.27, 3.93], są również przedmiotem licznych patentów [3.131].



Rys. 3.66. Układ narzędziowy wtryskarki dźwigniowo-hydrauliczny: a) schemat kinematyczny; *N* — zespół narzędzia, *1* — siłownik hydrauliczny, *2* — płyta oporowa, *3* — prowadnice, *4* — dźwignie górne, *5* — stół ruchomy, *6* — nakrętki na prowadnicach, *7* — zespół ruchomy formy, *8* — zespół nieruchomy formy, *9* — stół nieruchomy, b) zależność sił od odkształceń sprężystych: *1* — prowadnic, *2* — formy, *A* — stan po zamknięciu formy, *B* — stan po wypełnieniu gniazda, *C* — stan graniczny

Na rysunku 3.66a jest przedstawiony schemat kinematyczny typowego układu narzędziowego dźwigniowo-hydraulicznego. Łączna długość dźwigni, formy i przegubów jest nieco większa od długości prowadnic. W układzie musi zachodzić równowaga sił w każdym etapie procesu wtryskiwania. Po wyprostowaniu dźwigni głównych forma zostaje zamknięta z siłą $P_{s\,nom}$ (rys. 3.66b). Siłę tę określa uproszczony wzór [3.27]

$$P_{s\,nom} = \frac{E(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)}{\frac{\cos\alpha_1}{F_p} + \frac{L}{F_d} + \frac{H}{2L}\left(\frac{1}{F_d} + \frac{1}{F_f}\right)} \tag{3.76}$$

w którym E oznacza współczynnik sprężystości wzdłużnej, α_1 — kąt pomiędzy

dźwignią główną i prowadnicą w chwili początkowej, tj. zetknięcia się podzespołów formy, α_2 — ten sam kąt po wyprostowaniu dźwigni głównych, F_p — powierzchnie przekroju poprzecznego prowadnic, F_d — powierzchnie przekroju poprzecznego dźwigni, F_f — powierzchnie płaszczyzny podziału formy, L — długość dźwigni głównych, H — wysokość formy. Siła $P_{s\,nom}$ może przyjmować bardzo różne wartości, w niektórych rozwiązaniach nawet 100 000 kN [3.148]. W prowadnicach występują naprężenia rozciągające, w wyniku których zachodzi ich wydłużenie sprężyste $f_{s\,nom}$. Skrócenie sprężyste dźwigni pomija się w celu uproszczenia rozumowania. Ciśnienie tworzywa wtryśniętego do gniazda formy powoduje powstanie siły rozwierającej P_w określonej zależnością

$$P_w = p_g A \tag{3.77}$$

w której p_g oznacza ciśnienie panujące w gnieździe, A zaś — pole powierzchni rzutu wypraski i kanałów wtryskowych na płaszczyznę podziału formy. W rezultacie podzespoły formy zostają dociśnięte siłą szczątkową P_s (punkt B). W układzie wystąpi więc siła zwarcia P_z

$$P_z = P_w + P_s > P_{s\,nom} \tag{3.78}$$

Dopóki $P_z < P_{z\,max}$, nie nastąpi uchylenie formy. W granicznym przypadku $P_w = P_{z\,max}$ siła zamykania podzespołów formy zaniknie ($P_s = 0$). Jeżeli $P_w > P_{z\,max}$, forma zostanie rozwarta. W zależności od lepkości tworzywa można dopuścić pewną wartość uchylenia formy $X = 0{,}03 \div 0{,}07$ mm, nie powodującą jeszcze zalania płaszczyzny podziału przez tworzywo.

Siłę zamknięcia formy nastawia się i reguluje wskutek zmiany wartości kąta α_1[3.166], gdyż pozostałe wielkości we wzorze (3.76) są stałe w danym rozwiązaniu konstrukcyjnym układu i określonej formie. Korzysta się przy tym z przekształconego wzoru (3.76)

$$\cos \alpha_1 = \frac{E \cos \alpha_2 - P_{s\,nom}\left[\frac{L}{F_d} + \frac{H}{2L}\left(\frac{1}{F_d} + \frac{1}{F_f}\right)\right]}{\frac{P_{s\,nom}}{F_p} + E} \tag{3.79}$$

Wyniki przykładowych obliczeń dla układu o 4 jednakowych stalowych prowadnicach o średnicy 56 mm każda, formy o wysokości 250 mm, współczynniku sprężystości wzdłużnej $2{,}1 \cdot 10^{11}$ N/m^2, zestawiono w tabl. 3.7.

Kąt α_1 zmienia się na ogół poprzez obrót nakrętek na prowadnicach, co pociąga za sobą zmianę położenia nieruchomego stołu i podzespołu formy.

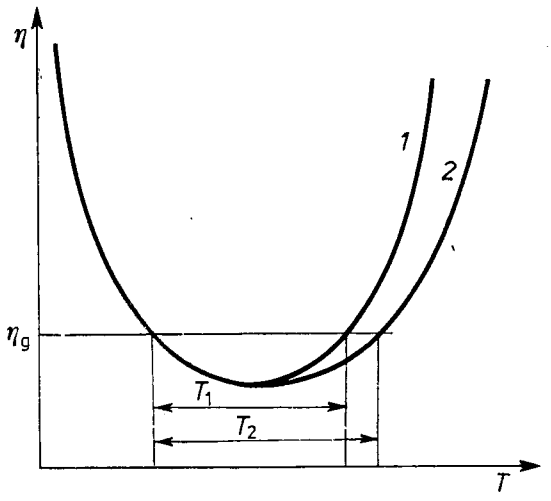
Tablica 3.7

Zależność siły $P_{s\,nom}$ zamknięcia formy wtryskowej od kąta α_1 pomiędzy dźwignią główną i prowadnicą w chwili zetknięcia się podzespołów formy (przykład)

$P_{s\,nom}$, N	784 800	588 600	392 400	196 200
α_1, rad	0,1064	0,0898	0,0729	0,0523

3.2.4. Wtryskiwanie tworzyw utwardzalnych

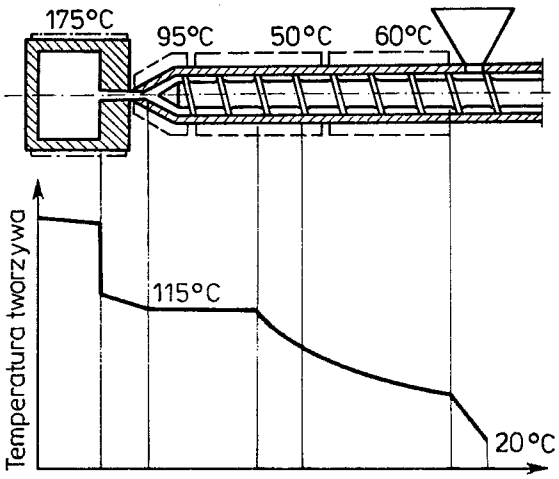
W czasie nagrzewania tworzyw utwardzalnych zachodzą dwa przeciwdziałające sobie zjawiska: uplastycznienie i następnie stapianie prowadzące do zmniejszenia lepkości oraz polimeryzacja kondensacyjna lub addycyjna, której skutkiem jest utwardzenie tworzywa (rys. 3.67). Z rysunku wynika, że tworzywa utwardzalne mają



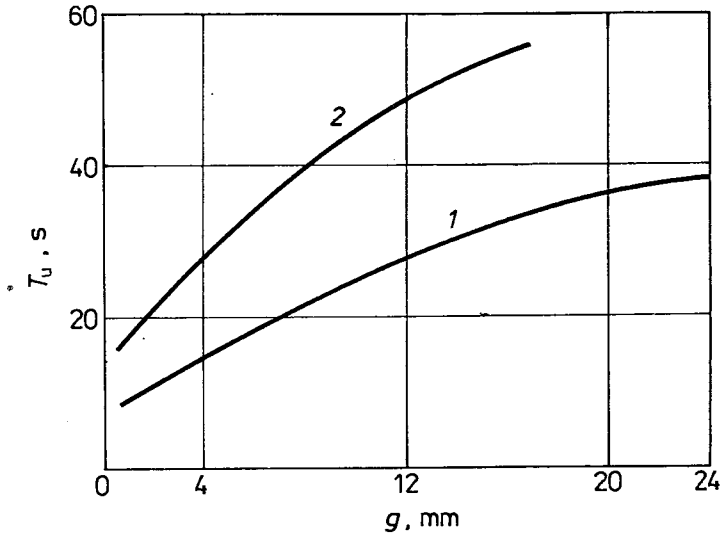
Rys. 3.67. Zależność lepkości η od czasu T nagrzewania tworzyw utwardzalnych: *1* — tworzywo o dużej szybkości utwardzania, *2* — tworzywo o mniejszej szybkości utwardzania, T_1 — czas dobrej wtryskiwalności tworzywa *1*, T_2 — czas dobrej wtryskiwalności tworzywa *2*, η_g — lepkość graniczna, po której przekroczeniu tworzywo nie może już być wtryskiwane

dobrą wtryskiwalność tylko w określonym krótkim czasie. Czas ten zazwyczaj wynosi od kilkunastu do kilkudziesięciu i więcej sekund oraz zależy od rodzaju tworzywa i temperatury; jest krótki np. dla tworzyw epoksydowych i długi dla tworzyw fenolowych oraz skraca się ze wzrostem temperatury. Do jego wyznaczania można używać plastografometru Kanawca.

Temperatura cylindra i w mniejszym stopniu tworzywa znajdującego się w nim narasta skokowo od stosunkowo niskiej na początku strefy zasilania do średniej w dyszy wtryskowej, a temperatura form jest wyższa od temperatury dyszy o kilkadziesiąt stopni, co przedstawiono przykładowo na rys. 3.68. Czas utwardzania wypraski zależy nie tylko od rodzaju tworzywa, ale również od temperatury cylindra i formy, rozmiaru kanałów wtryskowych i grubości ścianki wypraski [3.175]. Do tworzyw utwardzających się w rezultacie polimeryzacji addycyjnej, np. tworzyw epoksydowych, można stosować wyższą temperaturę formy i krótszy czas utwardzania, natomiast do tworzyw utwardzających się w wyniku polimeryzacji kondensacyjnej, np. tworzyw mocznikowych, stosuje się niższą temperaturę formy i dłuższy czas utwardzania, gdyż wydzielają się z nich uboczne produkty polimeryzacji — gazy (rys. 3.69). Gazy te muszą być odprowadzone z tworzywa, dlatego — dotychczas najczęściej — po wypełnieniu gniazda obniża się ciśnienie hydrauliczne wtryskiwania, jak również ciśnienie hydrauliczne zamykania formy, co powoduje chwilowe minimalne uchylenie formy wystarczające do umożliwienia wydostania się gazów na zewnątrz. Następnie zachodzi ponowne zwarcie podzespołów formy i ruch ślimaka pod



Rys. 3.68. Charakterystyczny rozkład temperatury cylindra i znajdującego się w nim tworzywa utwardzalnego [3.170]

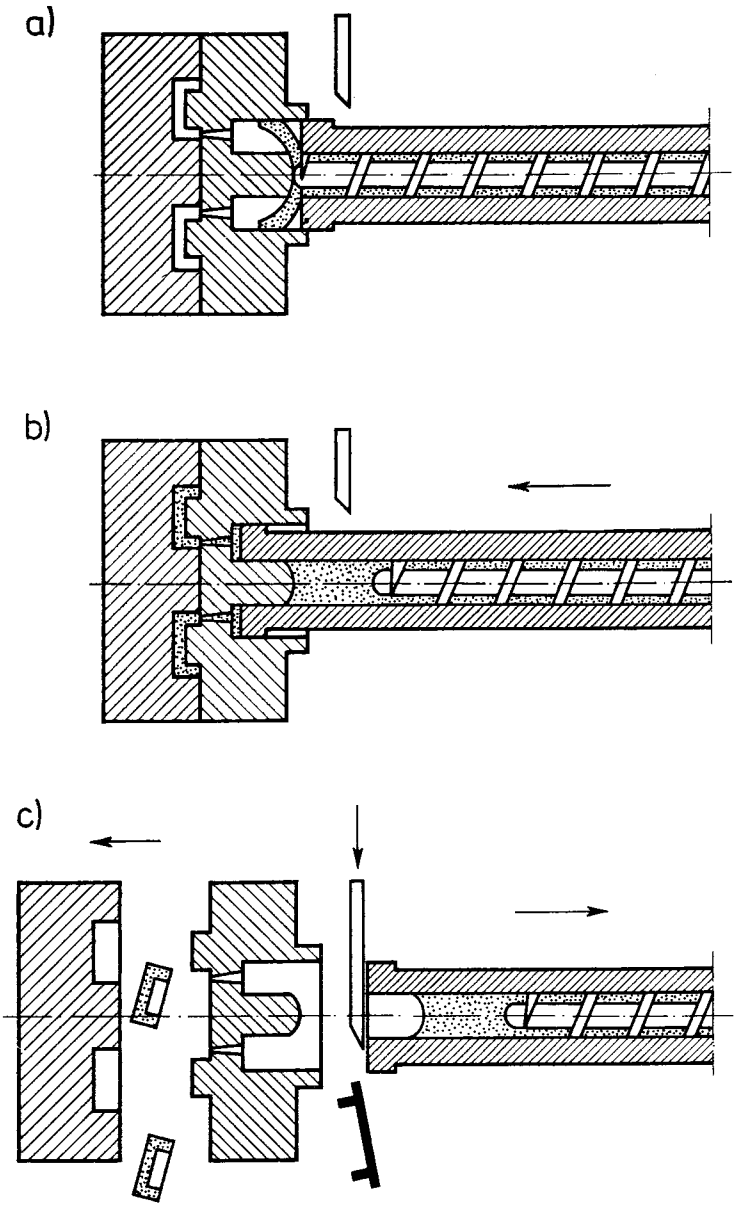


Rys. 3.69. Zależność czasu T_u utwardzania od grubości g wyprasek z: *1* — tworzywa epoksydowego w temperaturze 220°C, *2* — tworzywa mocznikowego w temperaturze 160°C [3.27]

określonym ciśnieniem w kierunku gniazda. Wszystko to powoduje znaczne wartości ciśnienia w gnieździe dochodzące do 40÷65 MPa.

Przy wtryskiwaniu tworzyw utwardzalnych stosuje się nagrzewanie elektryczne rezystancyjne, nagrzewanie za pomocą płynów, przede wszystkim oleju i wody, lub jednocześnie jedno i drugie. Nagrzewanie elektryczne realizuje się stosunkowo prosto, ale jego wadą jest pewna bezwładność cieplna i niemożność uzyskania jednakowego pola temperatury w określonych przekrojach wzdłużnych cylindra. Nagrzewanie za pomocą płynów jest nieco bardziej złożone, gdyż oprócz dobrego uszczelniania wymaga dodatkowo urządzeń regulujących temperaturę płynu. Zaletą jego jest szybkie wyrównywanie zmian temperatury na danym odcinku układu uplasyczniającego.

Bardzo mała redukcja objętości kanału ślimaka lub jej brak (rozdz. 1, p. 1.2.1), a nawet nieznaczna deredukcja (0,8 według A. Smorawińskiego [3.170]) powoduje, że w procesie uplastyczniania udział ciepła generowanego wskutek tarcia tworzywa, praktycznie niemożliwy do sterowania i regulacji, jest bardzo mały, a udział ciepła



Rys. 3.70. Schemat procesu wtryskiwania tworzyw utwardzalnych według firmy Drabert: a) wprowadzanie tworzywa do komory wtryskowej w formie, b) wtrysk tworzywa z komory do gniazda, c) otwieranie formy, wypychanie wypraski i oddzielanie wlewka (na rysunku nie pokazano grzejników) [3.62]

pochodzącego od grzejników jest bardzo duży — można nim dokładnie sterować i go regulować. Zalecany stosunek L/D ślimaka (tabl. 1.1) może być zastosowany we wtryskarkach specjalnie konstruowanych do tworzyw utwardzalnych, natomiast we wtryskarkach uniwersalnych stosunek ten na ogół pozostaje taki, jak do tworzyw termoplastycznych. Elementy geometryczne ślimaka należy tak dobrać, aby objętość tworzywa znajdująca się w części ślimaka o długości $(1{,}5 \div 2{,}5)D$ była równa największej objętości wtryskiwania. Dysza i zakończenie cylindra na długości $(2 \div 3)D$ powinny mieć ogrzewanie oddzielnie sterowane i regulowane.

Niektóre tworzywa utwardzalne, np. poliestrowe, są dostarczane do wtryskiwania w stanie plastycznym (kitu) z napełniaczem w postaci krótkich włókien szklanych. Wtryskiwanie tych tworzyw nastręcza wiele specyficznych problemów, spośród których można wymienić zapewnienie skutecznego wprowadzenia tworzywa do układu uplastyczniającego i ograniczenie rozdrabniania włókien szklanych, zwłaszcza

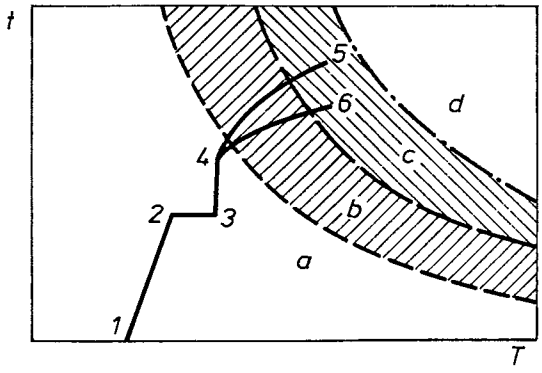
w procesie uplastyczniania [3.47]. Pierwszy z tych problemów rozwiązuje się np. poprzez wywieranie ciśnienia o wartości 3,5 MPa na tworzywo znajdujące się w zasobniku [3.188]. Ze wzrostem ciśnienia wtryskiwania, skraca się czas wtryskiwania [3.190]. Tworzywa poliestrowe napełnione krótkim włóknem szklanym są dobrze uplastycznione za pomocą układu tłokowego drganiowego (rys. 1.64). Do ich wtryskiwania stosuje się również specjalne wtryskarki tłokowe [3.43].

Należy jeszcze wspomnieć, że w firmie Drabert Sohne (Niemcy) opracowano wtryskarkę, w której rozdzielono konstrukcyjnie fazę wtrysku od pozostałych faz procesu wtryskiwania (rys. 3.70). Fazy do wtrysku i po nim zachodzą w sposób konwencjonalny, natomiast faza wtrysku zachodzi wskutek ruchu osiowego cylindra, którego czoło spełnia rolę tłoka pierścieniowego. Pozwala to na efektywniejsze wtryskiwanie tworzyw trudno wtryskiwalnych i zmniejszenie odpadów technologicznych.

3.2.5. Wtryskiwanie elastomerów utwardzalnych

Spośród elastomerów utwardzalnych największe znaczenie ma guma, która zalicza się do tworzyw utwardzalnych, ale cechy specyficzne wtryskiwania tego tworzywa uzasadniają celowość oddzielnego jego przedstawienia. Tworzywem wejściowym do wtryskiwania wyprasek z gumy jest niewulkanizowana mieszanka gumowa (elastomerowa). Jej nagrzewanie do temperatury 120 ÷ 180°C powoduje proces wulkanizowania [3.96]. Zależność lepkości, w umownych jednostkach, od czasu przebywania w danej temperaturze określa się za pomocą plastografometru Mooneya.

Analizę zależności temperatury tworzywa od czasu przeprowadza się na wykresach, jak na rys. 3.71. Po wprowadzeniu mieszanki do układu uplastyczniającego następuje



Rys. 3.71. Poglądowa zależność temperatury t mieszanki gumowej przechodzącej w wypraskę gumową od czasu T: linie przerywane oznaczają linie identycznego stanu fizycznego tworzywa; a — obszar przed wulkanizowaniem, b — obszar wulkanizowania, c — obszar stałego stopnia zwulkanizowania, d — obszar destrukcji tworzywa [3.170]

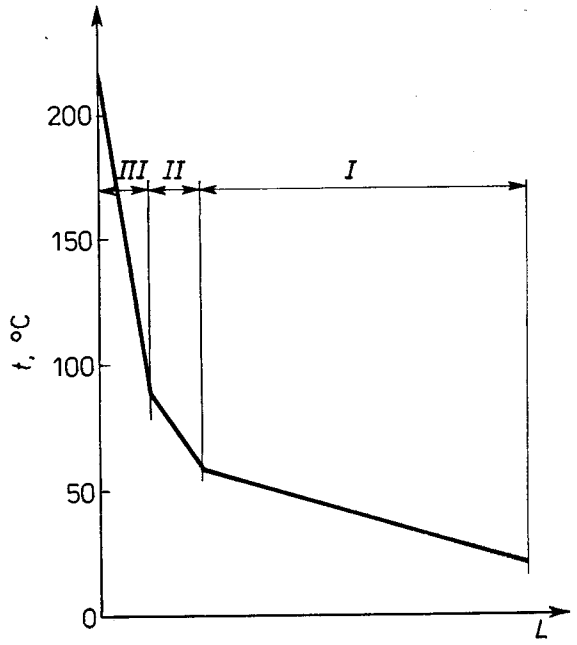
w ciągu kilku sekund podwyższenie jej temperatury do temperatury uplastyczniania (odcinek *1–2*). W czasie uplastyczniania następuje ruch zwrotny i obrotowy ślimaka z jednoczesnym gromadzeniem tworzywa w stałej temperaturze przed czołem ślimaka (odcinek *2–3*). W fazie wtrysku tworzywo zaczyna się bardzo szybko nagrzewać wskutek tarcia podczas przepływu przez dyszę, tulejkę, kanały i przewężki (odcinek

3–4). Szacuje się, że przyrosty temperatury tworzywa w czasie przepływu przez dyszę wynoszą od 10 do 35°C głównie w zależności od rodzaju kauczuku w mieszance (tabl. 3.8). Czas wypełniania gniazda powinien pozwolić na osiągnięcie granicy rozpoczęcia procesu wulkanizowania (obszaru *b*). Ponieważ tworzywo styka się z gorącymi ścianami gniazda, jego temperatura nadal wzrasta: szybciej na powierzchni wypraski (odcinek *4–5*) i wolniej we wnętrzu (odcinek *4–6*). Tak więc najważniejsze procesy zachodzą w formie. Przyjmuje się, że wpływające do gniazda tworzywo powinno mieć temperaturę niższą o 10÷50°C od temperatury wulkanizowania. Na przykład jeżeli ustali się temperaturę wulkanizowania na 180°C, a wzrost temperatury w dyszy na 25°C, to zalecana temperatura cylindra wynosi około 125°C. Charakter zmian temperatury tworzywa pokazano na rys. 3.72.

Tablica 3.8

Wzrost temperatury mieszanek opartych na różnych kauczukach podczas przepływu przez dyszę wtryskową [3.170]

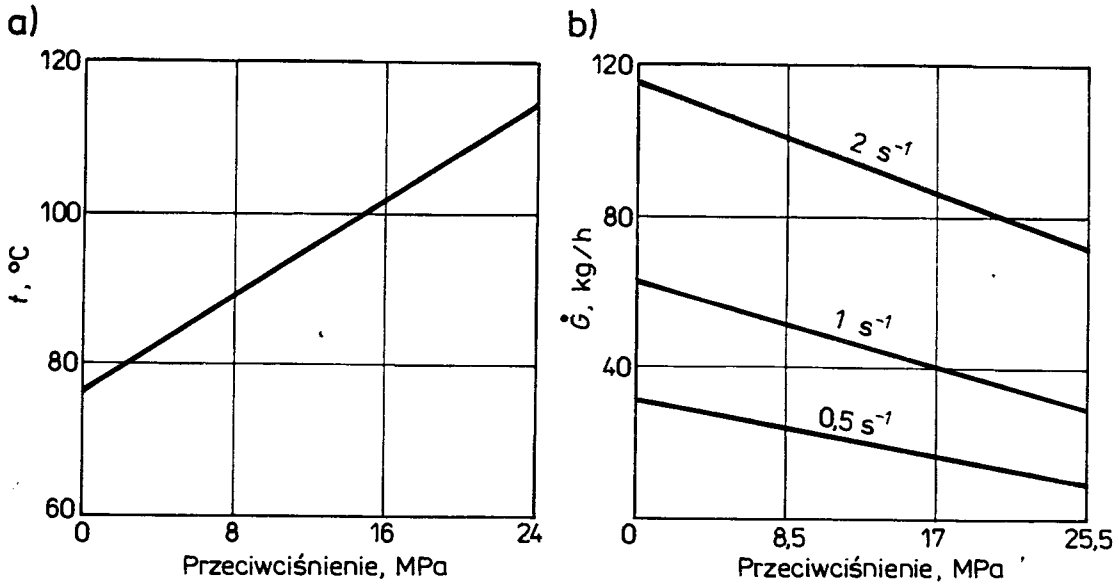
Rodzaj kauczuku	Wzrost temperatury, °C
Naturalny	35
Izoprenowy	10
Butadienowy	25
Chloroprenowy	23
Silikonowy	18



Rys. 3.72. Rozkład temperatury *t* tworzywa wzdłuż długości *L* układu uplastyczniającego (*I*), dyszy, wlewka, kanałów i przewężek (*II*) oraz gniazda (*III*) [3.172]

Bardzo często stosuje się nagrzewanie za pomocą płynów, dzieląc układ uplastyczniający tylko na dwie strefy grzejne. Przeciwciśnienie wpływa istotnie na warunki wtryskiwania, np. podnosi temperaturę tworzywa i zmniejsza natężenie przepływu

w układzie uplastyczniającym tym intensywniej, im większa jest prędkość obrotowa ślimaka (rys. 3.73). Zazwyczaj stosuje się dwa rozwiązania konstrukcyjne ślimaka: z deredukcją objętości kanału 0,5, uzyskiwaną poprzez zwiększenie głębokości kanału, zalecaną do mieszanek opartych na kauczuku naturalnym, oraz bez redukcji objętości kanału, co zaleca się do innych mieszanek. Stosunek L/D ślimaka wynosi $12 \div 15$ (tabl. 1.1). Zazwyczaj ślimaki mają otwór wzdłużny do chłodzenia, co zabezpiecza przed przedwczesnym podwulkanizowaniem mieszanki.



Rys. 3.73. Wpływ przeciwciśnienia na: a) temperaturę t, b) masowe natężenie przepływu $\dot{G}$ układu uplastyczniającego, mieszanki kauczuku nitrylowego [3.172]

3.2.6. Wtryskiwanie wieloskładnikowe

Wtryskiwanie wieloskładnikowe definiuje się jako wtryskiwanie pozwalające na otrzymanie wypraski litej, składającej się z co najmniej dwu odrębnych części, integralnie związanych, różniących się kolorem lub rodzajem, właściwościami oraz strukturą tworzywa, w jednym gnieździe formującym. Wtryskiwanie to można podzielić na:

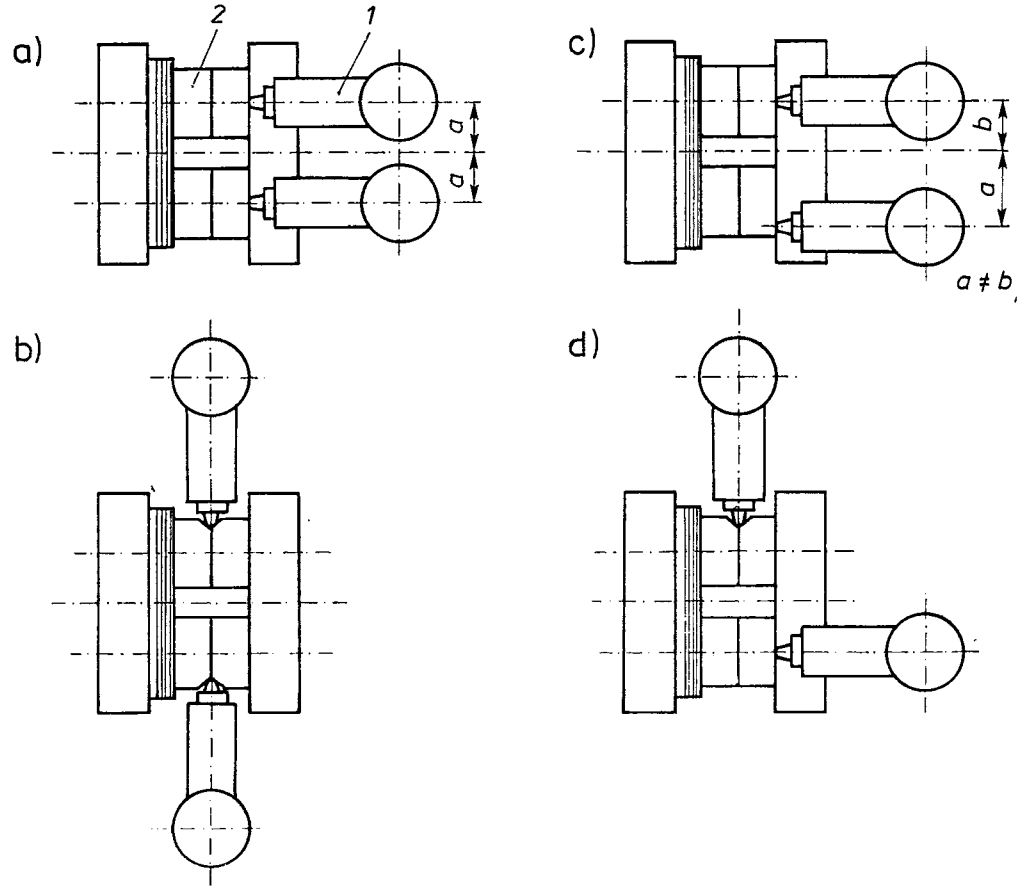
— otwarte, gdy części wyprasek łączą się ze sobą tak, że każda z nich jest widoczna; ponieważ z zasady wypraski te tworzą te same tworzywa, lecz o różnych kolorach, nosi ono również nazwę umowną wtryskiwania wielokolorowego,

— zamknięte, jeżeli części wyprasek łączą się ze sobą tak, że widoczna jest tylko jedna z nich, zamykająca inne wewnątrz siebie; nazywa się ona również umownie wtryskiwaniem wielotworzywowym.

Wtryskiwanie otwarte – wielokolorowe

Istota wtryskiwania wielokolorowego polega na tym, że bezpośrednio do formy lub form wtryskowych mocowanych do płyty obrotowej bądź przesuwanej, z oddzielnych układów uplastyczniających, wtryskuje się sekwencyjnie tworzywa — z każdego układu w innym kolorze.

Dość proste, ale mające duże znaczenie, jest wtryskiwanie dwukolorowe do jednej formy dwugniazdowej. Wzajemne usytuowanie formy i obu układów uplastyczniających może być (rys. 3.74): równoległe, prostopadłe, równoległe niesymetryczne

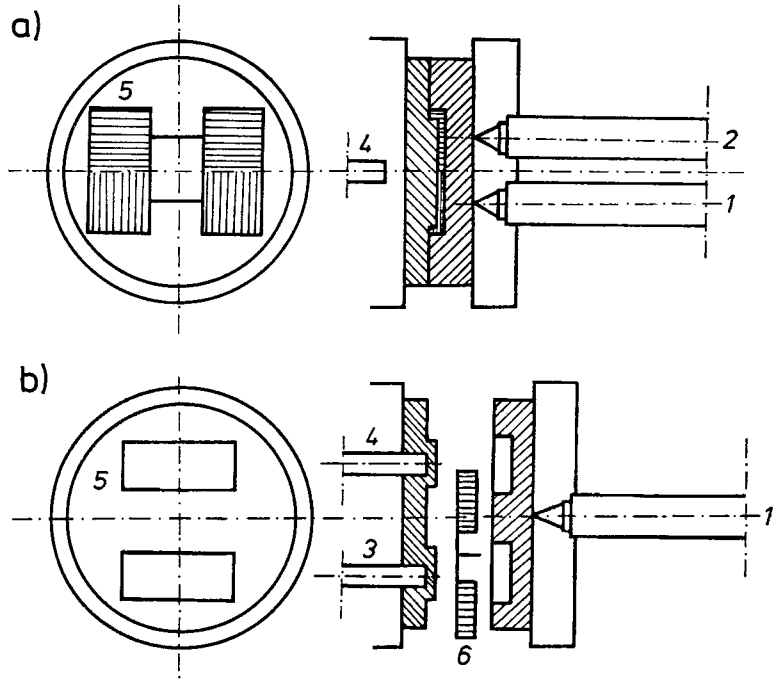


Rys. 3.74. Możliwości wzajemnego usytuowania układów uplastyczniających i formy wtryskowej dwugniazdowej we wtryskiwaniu dwukolorowym: a) równoległe, b) prostopadłe, c) równoległe niesymetryczne, d) równoległo-prostopadłe (mieszane); *1* — układy uplastyczniające, *2* — forma

i równoległo-prostopadłe, czyli mieszane. W fazie pierwszej cyklu, po zamknięciu formy, następuje dosunięcie i wtrysk tworzywa z obu układów uplastyczniających jednocześnie: z układu (*1*) tworzywa pierwszego koloru, np. czerwonego, i z układu (*2*) tworzywa drugiego koloru, np. żółtego (rys. 3.75). W drugiej fazie, po ochłodzeniu wypraski, zachodzi otwarcie formy (*5*), uwolnienie i wypchnięcie wypychaczami (*3*) i (*4*) dwóch wyprasek dwukolorowych (*6*). Następnie fazy powtarzają się cyklicznie.

Wtryskiwanie dwukolorowe do dwóch form dwugniazdowych jest już bardziej złożone. Obie formy mocuje się np. do płyty obrotowej, wykonującej cykliczne obroty o $(\pi/2)$ rad, a wtryskiwanie z obu układów uplastyczniających odbywa się cyklicznie w ustalonej kolejności — dokładniejszy opis tego procesu jest podany w literaturze [3.156].

Wtryskiwanie trójkolorowe do formy dwugniazdowej może przebiegać następująco (rys. 3.76): w fazie pierwszej procesu za pomocą dwóch układów uplastyczniających (*1*) i (*2*) wtryskiwane są do gniazda górnego tworzywa dwu kolorów, np. czerwonego i pomarańczowego. W tym czasie układ uplastyczniajacy (*3*) jest jeszcze wyłączony z cyklu. W fazie drugiej następuje otwarcie formy (*5*) i obrót płyty (*7*) z formami



Rys. 3.75. Schemat wtryskiwania dwukolorowego, w usytuowaniu równoległym, do formy wtryskowej dwugniazdowej: a) wyglad z góry po wypełnieniu gniazda, b) wygląd z boku po wypchnięciu wypraski; oznaczenia w tekście

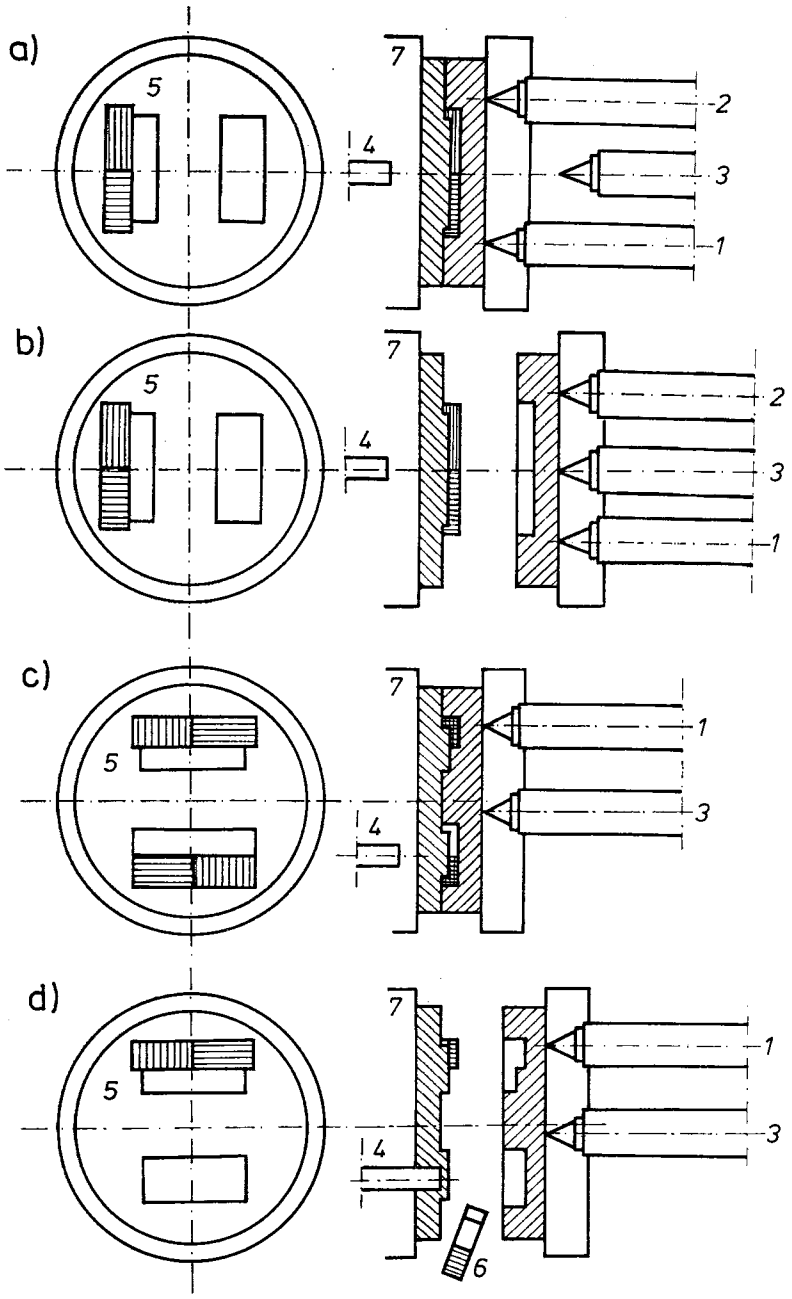
o π rad: gniazdo górne wypełnione tworzywem o dwu kolorach zajmuje położenie gniazda dolnego i odwrotnie. W tym czasie trzeci układ uplastyczniający jest włączany do cyklu. W trzeciej fazie, po zamknięciu formy, następuje jednocześnie wtryskiwanie z układu uplastyczniającego (*3*) tworzywa koloru trzeciego, np. białego, do gniazda dolnego i wtryskiwanie z układów uplastyczniających (*1*) i (*2*) tworzywa do gniazda górnego. W ostatniej, czwartej fazie zachodzi otwarcie formy (*5*), uwolnienie i wypchnięcie wypraski trójkolorowej (*6*) z gniazda dolnego za pomocą wypychacza (*4*), obrót formy o π rad i jej zamknięcie. Następnie powtarzają się cyklicznie tylko fazy: trzecia i czwarta.

Wtryskiwanie wielokolorowe stosuje się do otrzymywania takich przedmiotów, jak np. klawisze do maszyn do pisania i komputerów, klosze świateł samochodowych, filiżanki [3.176]. Wtryskiwanie wielokolorowe ma również wady, do których głównie zalicza się duże koszty zakupu wtryskarek i znaczne ich rozmiary, skomplikowaną konstrukcję form i duże koszty ich wykonania oraz długie czasy cyklu procesu wtryskiwania. Wtryskiwanie to jest więc ekonomicznie opłacalne przy dostatecznie dużej liczbie wyprasek.

Wtryskiwanie zamknięte – wielotworzywowe

Istota wtryskiwania wielotworzywowego polega na tym, że z oddzielnych układów uplastyczniających wtryskuje się sekwencyjnie tworzywa do formy przez wspólną tulejkę wtryskową.

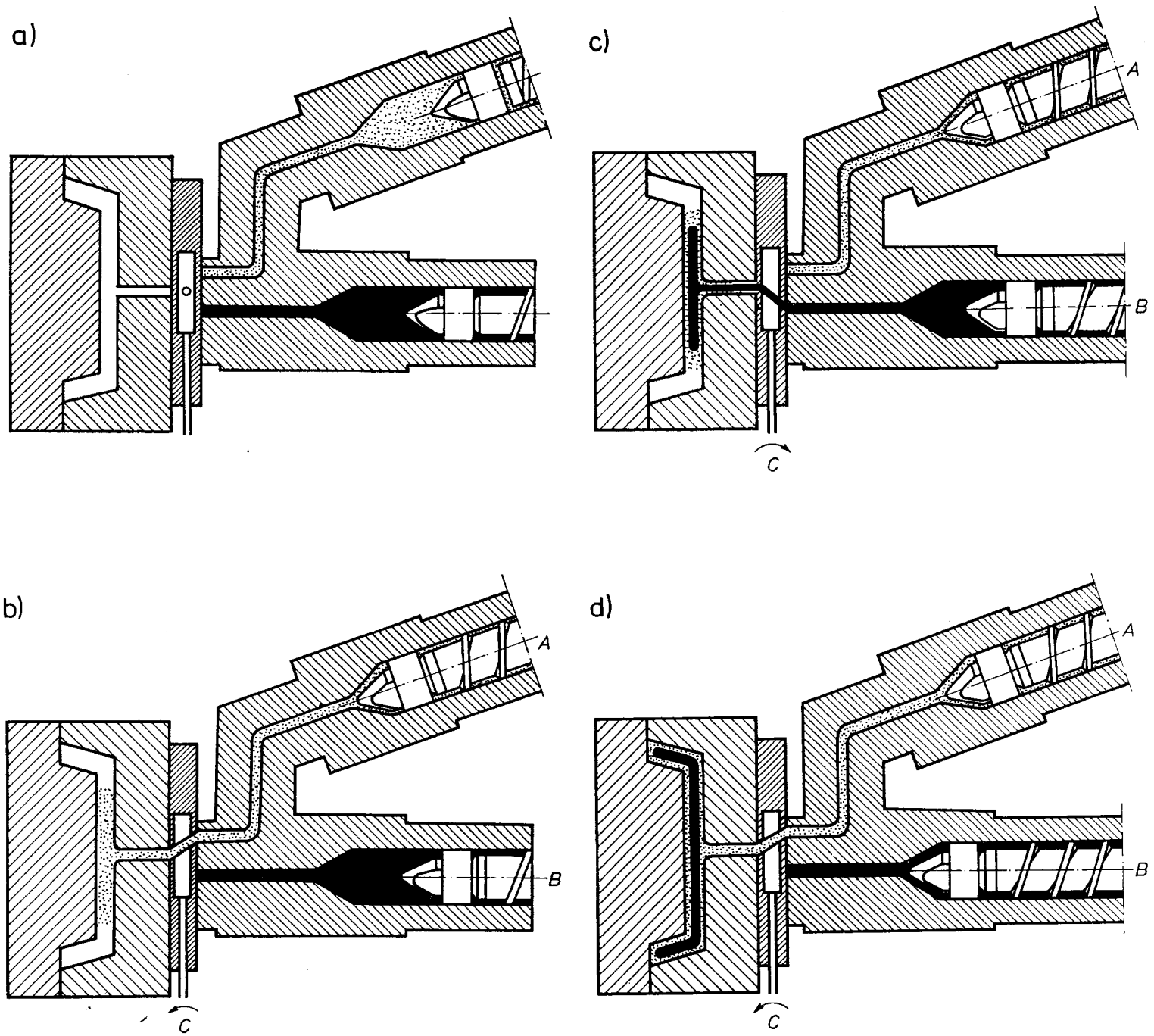
Stosunkowo proste jest wtryskiwanie dwutworzywowe zaworowe do formy jednogniazdowej. W fazie pierwszej procesu wtryskiwania (rys. 3.77a) dwa układy uplastyczniające *A* i *B* są wypełnione tworzywami i oba ślimaki znajdują się w pozycji cofniętej, a zawór *C* przełączający przepływ tworzywa jest zamknięty dla obydwu



Rys. 3.76. Schemat wtryskiwania trójkolorowego do formy wtryskowej dwugniazdowej: a) faza pierwsza, wygląd z góry po wypełnieniu gniazda, b) faza druga, wygląd z góry po otwarciu formy, c) faza trzecia, wygląd z boku po otwarciu formy, d) faza czwarta, wygląd z boku po wypchnięciu wypraski; oznaczenia w tekście

układów. W fazie drugiej (rys. 3.77b) otwarcie zaworu *C* i ruch do przodu ślimaka układu *A* powoduje wytrysk tworzywa do formy. Następnie przestawiając zawór *C* wtryskuje się tworzywo z układu *B*, co pokazano na rys. 3.77c. Można to z pewnym uproszczeniem porównać z nadmuchiwaniem balonu powietrzem. Tworzywo wtryskiwane do środka rozprowadza tworzywo poprzednio wtryśnięte po ściankach gniazda, nie powodując utraty jego spójności. Na końcu tej fazy gniazdo jest całkowicie wypełnione tworzywami, a ślimaki zajmują przednie położenie. W kolejnej czwartej fazie (rys. 77d) przestawia się zawór *C* i ślimak układu *A* przesuwa się nieco do przodu, powodując dotryśnięcie tworzywa zewnętrznego. W ostatniej, piątej fazie następuje zamknięcie zaworu, otwarcie formy, uwolnienie i wypchnięcie wypraski dwutworzywowej oraz odsuwania ślimaka wprawionego w ruch obrotowy. Następnie wszystkie fazy powtarzają się cyklicznie.

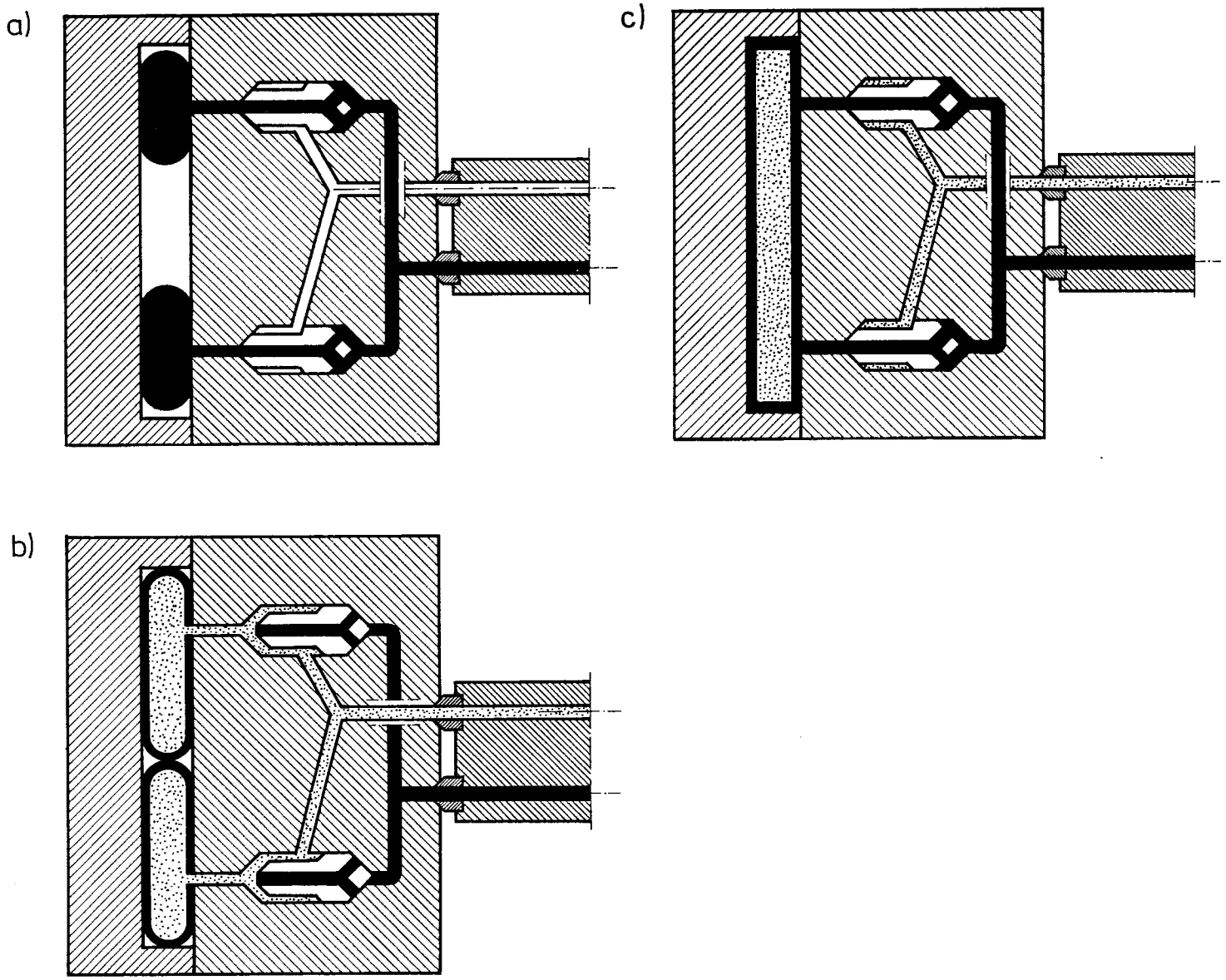
Oprócz wtryskiwania dwutworzywowego zaworowego wyróżnić należy wtryskiwanie dwutworzywowe współśrodkowe przez dyszę dwukanałową, np. firmy Billion (Francja) [3.170].



Rys. 3.77. Schemat wtryskiwania dwutworzywowego zaworowego do formy wtryskowej jednogniazdowej: a, b, c oraz d — poszczególne fazy procesu wtryskiwania; oznaczenia w tekście

Bardziej złożone jest wtryskiwanie dwutworzywowe wielopunktowe. Tworzywa doprowadza się do gniazda kanałami grzanymi. Zasada wtryskiwania jest taka sama, jak wtryskiwania zaworowego. Schemat wtryskiwania dwupunktowego pokazano przykładowo na rys. 3.78. Utrudnienia w tym wtryskiwaniu w porównaniu z poprzednimi polegają na tym, że obecność kilku punktów wtryskiwania powoduje powstawanie linii łączenia strumieni tworzyw.

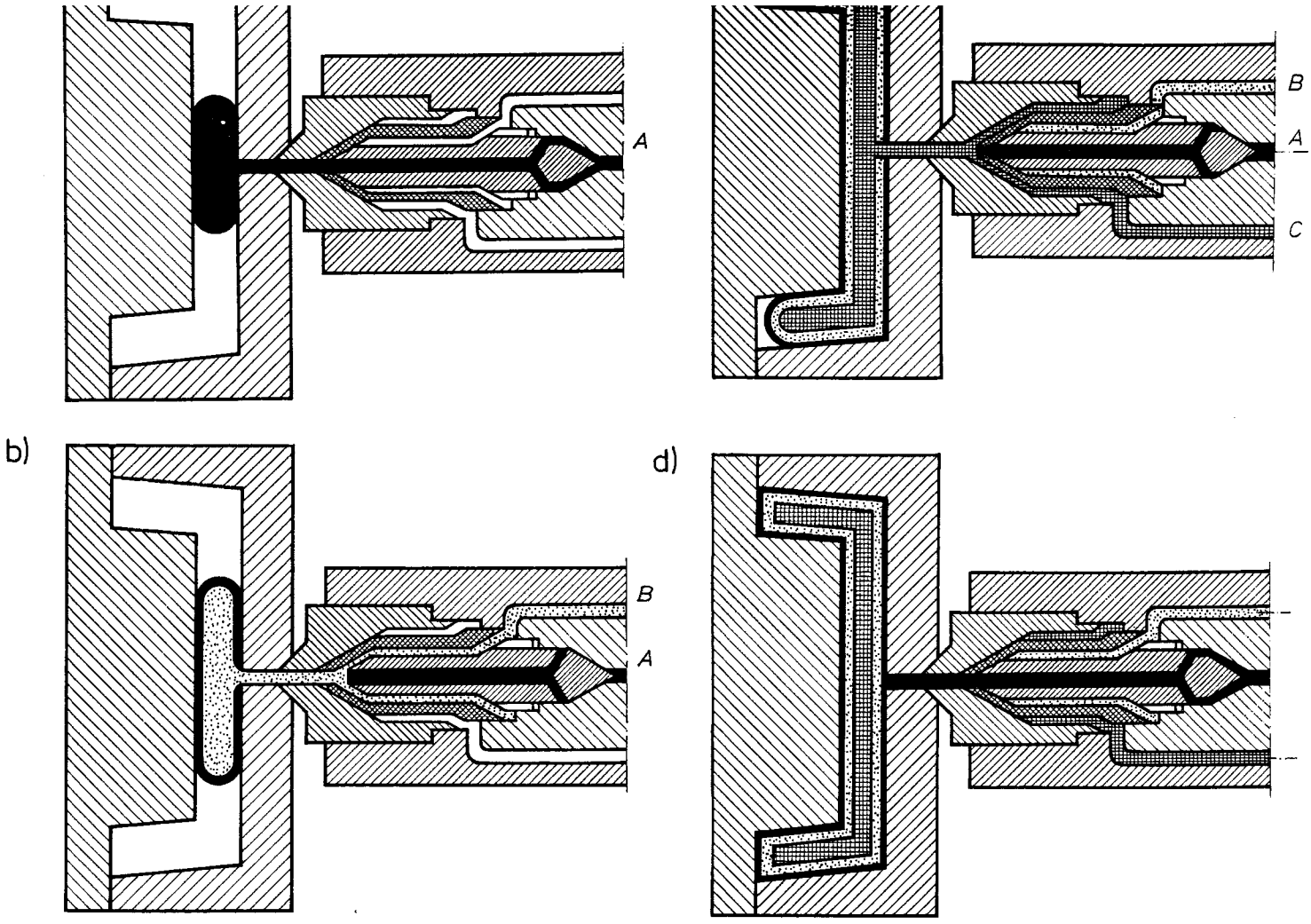
Wtryskiwanie trójtworzywowe do formy jednogniazdowej można realizować w sposób podobny do już opisanych, stosując specjalną dyszę dostosowaną do trzech strumieni tworzyw, czyli dyszę trójkanałową. Podstawowym problemem jest dozowanie w odpowiedniej ilości i w odpowiednim czasie każdego tworzywa, tak, aby nie tworzyły się zaburzenia przepływu i niekontrolowane mieszanie tworzyw i aby



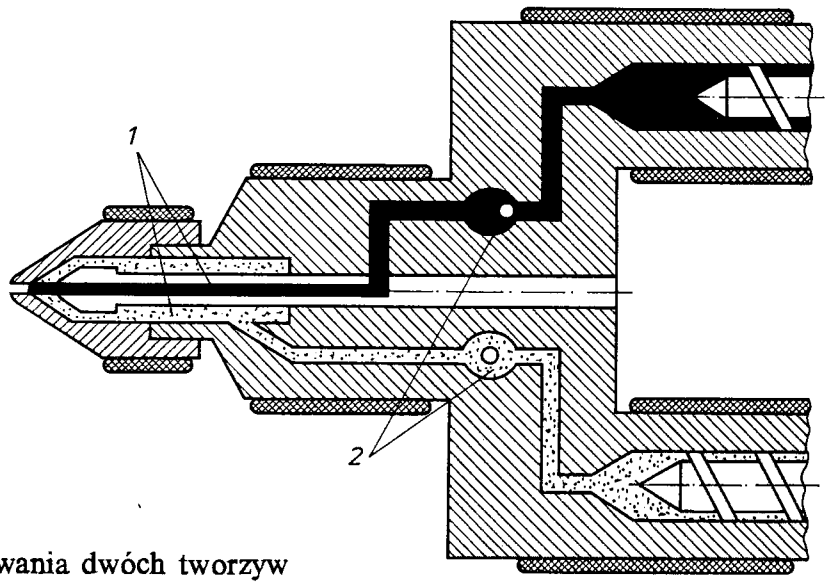
Rys. 3.78. Schemat wtryskiwania dwutworzywowego dwupunktowego do formy wtryskowej jednogniazdowej: a, b oraz c — poszczególne fazy procesu wtryskiwania

zachodziło efektywne wypełnianie gniazda. W fazie pierwszej procesu (rys. 3.79a), po zamknięciu formy, następuje wtrysk tworzywa *A*. Dysza wtryskowa jest tak ustawiona, że tworzywo może przepływać tylko przez kanał środkowy. W drugiej fazie (rys. 3.79b) odbywa się zablokowanie kanału tworzywa *A* przez cofnięcie części środkowej dyszy i jednoczesne odblokowanie kanału tworzywa *B* oraz wtrysk tego tworzywa. W fazie trzeciej (rys. 3.79c) zewnętrzna część dyszy przesuwa się do tyłu, blokując kanał tworzywa *B* i otwierając kanał tworzywa *C* do wtrysku. W fazie czwartej (rys. 3.79d) następuje otwarcie kanału środkowego poprzez ruch do przodu części zewnętrznej i wewnętrznej dyszy oraz dotryśnięcie tworzywa *A*. W ostatniej, piątej fazie zamykają się wszystkie trzy kanały, zachodzi otwarcie formy, uwalnianie i wypchnięcie wypraski. Następnie wszystkie fazy powtarzają się cyklicznie.

Wtryskiwanie wielotworzywowe, zwłaszcza wielopunktowe, pozwala na otrzymanie wyprasek o stosunkowo dużych rozmiarach. Każda warstwa tworzywa w wyprasce spełnia inną funkcję, np. warstwa zewnętrzna jest odporna na zużywanie tribologiczne, przenosi zasadnicze obciążenie zewnętrzne i nadaje wyprasce trwały, żądany wygląd,



Rys. 3.79. Schemat wtryskiwania trójtworzywowego do formy wtryskowej jednogniazdowej: a, b, c oraz d — poszczególne fazy procesu wtryskiwania



Rys. 3.80. Schemat współwtryskiwania dwóch tworzyw w rozwiązaniu firmy Nissei: *1* — dwa kanały dyszy, *2* — zawory przepływu zwrotnego

natomiast warstwy wewnętrzne spełniają głównie rolę materiału wypełniającego, a więc mogą być z tworzywa o gorszych właściwościach lub z tworzywa wtórnego, a więc z tworzyw tańszych. Wady tego wtryskiwania są w zasadzie takie same, jak wytryskiwania wielokolorowego.

Od 1979 r. znane jest współwtryskiwanie, w dwu głównych rozwiązaniach: firmy Nissei (Japonia) i firmy Arburg (Niemcy) [3.69, 3.125]. Układy uplastyczniające w rozwiązaniu firmy Nissei są umieszczone równolegle i połączone za pomocą dyszy dwukanałowej (rys. 3.80). Zawory przepływu zwrotnego zabezpieczają przed niekontrolowanym mieszaniem się dwóch tworzyw. Oprócz wtryskiwania sekwencyjnego możliwe jest współwtryskiwanie:

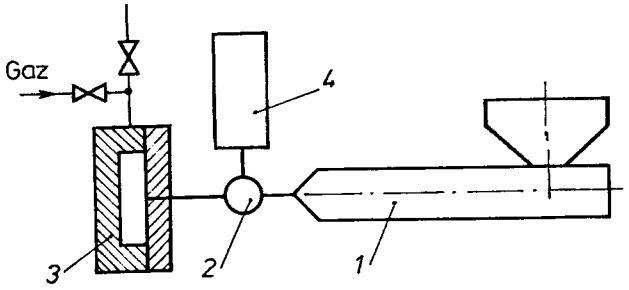
— jednoczesne, ciągłe z układów uplastyczniających,

— ciągłe z jednego układu i z zaprogramowanymi przerwami z drugiego układu (czas przerw jest regulowany bezstopniowo od 0,01 s z dowolną częstotliwością). Drugie rozwiązanie współwtryskiwania służy do otrzymywania wyprasek mających na powierzchni trwałe i powtarzalne wzory marmurkowe.

3.2.7. Wtryskiwanie porujące

Istota fizyczna otrzymywania wyprasek porowatych jest taka sama, jak wytłoczyny porowatej (p. 3.1.4).

Przyjmuje się, że wtryskiwanie porujące zapoczątkowano w Union Carbide Corporation (USA) w 1966 r. [3.197]. Polegało ono na wprowadzeniu pod ciśnieniem, w połowie długości układu uplastyczniającego, gazu, który rozpuszczał się w stopionym tworzywie termoplastycznym, i następnie wtryśnięciu tworzywa do gniazda formującego. Modyfikacją tego jest wprowadzenie gazu do szczelnego gniazda (rys. 3.81) i następnie wtryskiwanie. Napotykające sprężony gaz tworzywo rozpuszcza się w nim, a nadmiar gazu cofa się do cylindra bocznego, w którym po odcięciu zaworem rozdzielacza jest akumulowany do kolejnego cyklu wtryskiwania.



Rys. 3.81. Wtryskiwania porujące z doprowadzeniem gazu do gniazda formującego: *1* — układ uplastyczniający, *2* — rozdzielacz, *3* — forma hermetyczna, *4* — cylinder akumulacyjny [3.170]

Największe znaczenie ma jednak wtryskiwanie porujące, w którym jako materiał wejściowy stosuje się tworzywo z poroforem wprowadzonym do niego w procesie wytwarzania. Dzieli się je na niskociśnieniowe i wysokociśnieniowe.

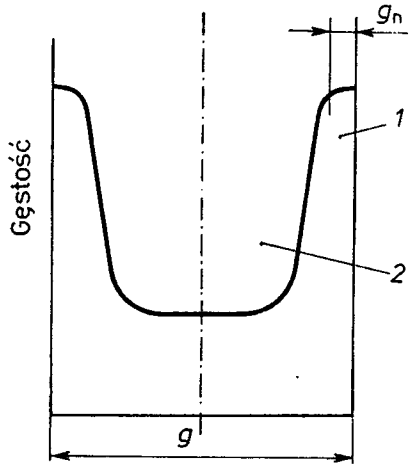
Wtryskiwanie porujące niskociśnieniowe

Wtryskiwanie porujące niskociśnieniowe polega na tym, że objętość wtryskiwanego do gniazda formującego tworzywa, z rozpuszczonym w nim gazem pochodzącym z rozkładu poroforu, jest mniejsza od objętości gniazda. W warunkach niskiego ciśnienia panującego w gnieździe, gaz wydziela się do roztworu pod ciśnieniem $1 \div 8$

MPa i formuje w masie tworzywa drobne pęcherzyki, które powodują wzrost objętości i całkowite wypełnienie gniazda tworzywem. Stopień porowatości reguluje się ilością tworzywa wprowadzonego do gniazda; największa możliwość zwiększenia objętości zwykle nie przekracza 50% [3.116]. W rezultacie otrzymuje się wypraski o powierzchni nieco chropowatej. W niektórych przypadkach może to być korzystne, np. do imitacji powierzchni drewna, jednak w większości zastosowań jest niepożądane. Jedną z istotnych zalet tego wtryskiwania jest prawie zupełny brak anomalii przetwórczych wyprasek w kształcie zapadnięć powierzchni, co wynika z możliwości wyrównywania ewentualnych zapadnięć powierzchni poprzez różny stopień porowatości, przebiegającego „samoczynnie" w procesie wtryskiwania.

Do podstawowych cech charakterystycznych tego wtryskiwania należą: duża szybkość wtrysku i małe ciśnienie wtryskiwania. Miarą szybkości wtrysku może być prędkość ruchu osiowego ślimaka w tej fazie procesu wtryskiwania; jest ona bardzo duża i dochodzi do 0,5 m/s i więcej. W związku z tym czas fazy wtrysku jest bardzo krótki, np. we wtryskarkach firmy Siemag (Niemcy) wynosi on 0,1 ÷ 0,2 s dla wyprasek o masie do 5 kg i do 0,75 s dla wyprasek o masie 15 ÷ 25 kg. Stąd niekiedy mówi się o wtrysku eksplozyjnym. Ciśnienie wtryskiwania jest potrzebne jedynie do pokonania oporów występujących podczas przepływu tworzywa przez cylinder, dysze wtryskowe, a nie do oddziaływania na tworzywo wypełniające gniazdo, i z tego powodu wynosi około 50% ciśnienia stosowanego podczas wtryskiwania tworzyw litych. Małe ciśnienie wtryskiwania powoduje, że siła zamknięcia formy nie musi być duża, co upraszcza konstrukcję układu zamykająco-otwierającego. Omawiane wtryskiwanie stosuje się do otrzymywania wyprasek o stosunkowo znacznych rozmiarach, np. mających zastosowanie w budowie sprzętu mechanicznego i w meblarstwie. Wynika z tego kolejna cecha wtryskarek, a mianowicie są one wyposażone w stoły o dużych powierzchniach do mocowania dużych form wtryskowych.

Wypraska porowata ma litą cienką warstwę zewnętrzną — naskórek o różnej grubości, a rdzeń porowaty o zwiększającym się stopniu porowatości w miarę oddalania się od powierzchni zewnętrznej (rys. 3.82). Właściwości wyprasek porowatych z danego tworzywa zależą w istotny sposób od warunków wtryskiwania, np.

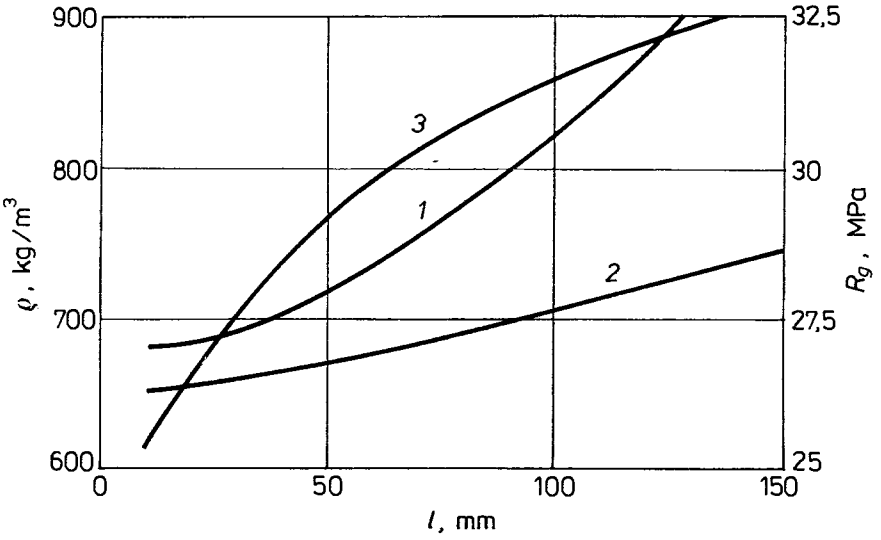


Rys. 3.82. Charakterystyczny rozkład gęstości w ściance wypraski porowatej: *1* — naskórek, *2* — rdzeń, g — grubość ścianki, g_n — grubość naskórka

gęstość i wytrzymałość na zginanie zależą od długości drogi przepływu tworzywa w formie (rys. 3.83). Przepływ tworzywa w formie nie powoduje orientacji struktury porowatej rdzenia, jest natomiast przyczyną orientowania strukturalnego naskórka tym większego, im dłuższa jest droga przepływu tworzywa w formie. Na ogół wypraski porowate nie są poddawane dużym obciążeniom zewnętrznym w czasie użytkowania, ale muszą zachować znaczną sztywność, którą charakteryzuje się *współczynnikiem sztywności B* określanym zależnością [3.103]

$$B = \frac{E_p \rho_l^3}{E_l \rho_p^3} - 1 \tag{3.80}$$

w której E oznacza współczynnik sprężystości przy zginaniu, ρ— gęstość, indeks l dotyczy tworzywa litego, a indeks p — tworzywa porowatego.



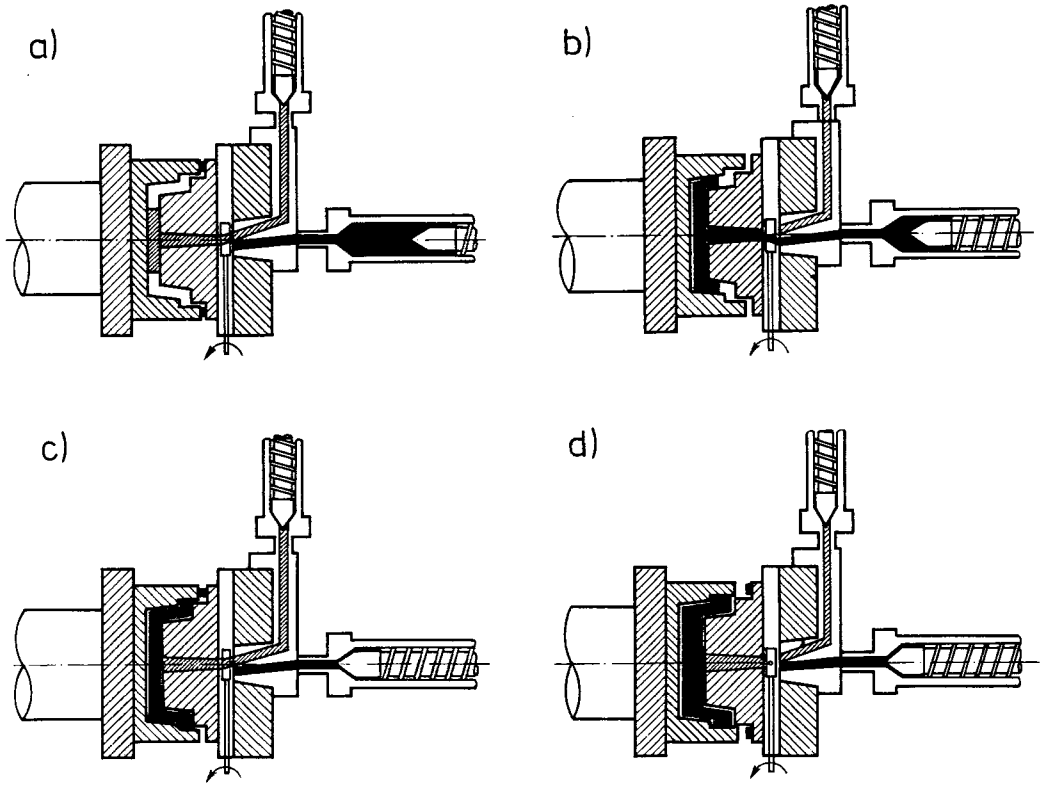
Rys. 3.83. Zależność gęstości ρ (krzywe *1* i *2*) [3.103] oraz wytrzymałości R_g na zginanie (krzywa *3*) [3.119] od długości *l* drogi przepływu tworzywa w formie: *1* — PA 6 o nazwie Tarnamid T-27, *2* — PA 6 o nazwie Itamid 250, *3* — PC o nazwie Bistan AW; obciążenie prostopadłe do naskórka (próbki wycięte prostopadle do kierunku przepływu tworzywa)

Wtryskiwanie porujące wysokociśnieniowe

Wtryskiwanie to może być przeprowadzone w ten sposób, że po całkowitym wypełnieniu gniazda formującego tworzywem i wytworzeniu się ochłodzonego naskórka, forma ulega częściowemu otwarciu. Gazy, zawarte w stopionym tworzywie, wewnątrz wypraski gwałtownie rozszerzają się, powodując powstawanie struktury porowatej. Stopień porowatości można regulować przez wybór momentu i długości drogi otwarcia formy. Powiększenie objętości gniazda wypełnionego stopionym tworzywem odbywa się także inaczej, np. poprzez wycofanie ruchomych wkładek gniazda, tak jak w rozwiązaniu firm japońskich Toshiba Machine Company i Asahi-Daw [3.201].

Znane są również rozwiązania zbliżone od wtryskiwania dwutworzywowego, a więc rozwiązania, w których oddziela się wtryskiwanie litego naskórka od wtryskiwania

porowatego rdzenia. W rozwiązaniu firmy ICI (Wielka Brytania) [3.128] początkowo wtryskuje się tworzywo bez poroforu, wypełniając gniazdo tylko częściowo, a następnie z drugiego układu uplastyczniającego wtryskuje się tworzywo z poroforem. W celu umożliwienia powstania struktury porowatej, po całkowitym wypełnieniu gniazda następuje częściowe otwarcie formy (rys. 3.84). Stanowi ono zatem modyfikację wtryskiwania dwutworzywowego zaworowego (punkt poprzedni). Inne rozwiązanie — firmy Battenfeld (Niemcy) — jest z kolei modyfikacją wtryskiwania dwutworzywowego poprzez dyszę dwukanałową. Tworzywo rdzenia może być tu napełnione materiałem przewodzącym prąd elektryczny, np. sadzą, co daje efekt ekranowania promieniowania elektromagnetycznego [3.145].



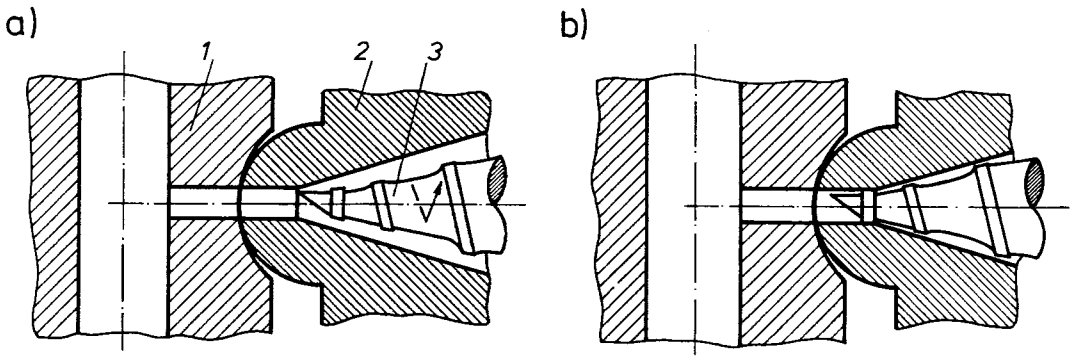
Rys. 3.84. Schemat wtryskiwania porującego wysokociśnieniowego według firmy ICI: a) wtryskiwanie naskórka, b) wtryskiwanie rdzenia, c) dotryśnięcie tworzywa naskórka, d) porowanie rdzenia

Do wtryskiwania wysokociśnieniowego zalicza się umownie również proces, w którym najpierw wtryskuje się do gniazda pewną ilość tworzywa, następnie przez dyszę wtryskową lub przez otwór w gnieździe wprowadza się gaz pod ciśnieniem (np. azot) i z kolei wtryskuje się pozostałą część tworzywa [3.199]. Wtryskiwanie to nosi nazwę GIP (ang. *Gas Injection Process*); w jego rezultacie otrzymuje się wypraski puste, a wtryskarki do niego produkuje m.in. firma Mannesmann Demag (Niemcy).

Wypraski porowate otrzymuje się także w procesie współwytłaczania porującego. Otóż we wspomnianej już firmie Siemag opracowano w 1973 r. proces jednoczesnego, ciągłego wtryskiwania dwóch tworzyw: jednego bez poroforu i drugiego z poroforem. Jest to możliwe dzięki specjalnej konstrukcji dyszy dwukanałowej.

3.2.8. Wtryskiwanie wysokotemperaturowe

Przebieg procesu wtryskiwania wysokotemperaturowego, zwanego też wtryskiwaniem niskociśnieniowym lub odlewaniem wtryskowym (zapoczątkowanego w 1961 r. [3.80]), jest w istocie następujący. Po zamknięciu formy wtryskowej, obracający się ślimak, o stożkowym i uzwojonym zakończeniu, utrzymywany w przednim położeniu bezpośrednio przy dyszy wtryskowej (rys. 3.85), powoduje przepływ tworzywa do gniazda formy, aż do jej wypełnienia. Pod koniec wypełniania gniazda powstaje ciśnienie, które przezwycięża ciśnienie hydrauliczne, co powoduje pewne cofnięcie się ślimaka. Kolejną fazą jest odsunięcie ślimaka do przodu, powodujące uzupełnienie ubytku objętości tworzywa powstałego wskutek skurczu wtryskowego. W skrajnym przednim położeniu ślimaka na tworzywo jest wywierane ciśnienie docisku, podobnie jak podczas wtryskiwania konwencjonalnego, lecz o większej wartości (w czasie wtryskiwania konwencjonalego ciśnienie docisku jest mniejsze od ciśnienia wtryskiwania — rys. 3.44).



Rys. 3.85. Położenie ślimaka względem dyszy wtryskowej w procesie wtryskiwania wysokotemperaturowego: a) w czasie wypełniania gniazda formy, b) podczas otwarcia formy; *1* — fragment formy, *2* — fragment dyszy, *3* — końcówka ślimaka

Przed wypełnieniem gniazda tworzywo przetwarzane nagrzewa się przez krótki okres czasu do wysokiej temperatury, w celu znacznego chwilowego zmniejszenia lepkości i umożliwienia przepływu przez dyszę i kanały przepływowe w formie oraz wypełnienia gniazda bez większych oporów. Powoduje to również, że wypraski charakteryzują się dużą wytrzymałością i znacznym połyskiem [3.170]. Należy stosować stosunkowo duże przekroje poprzeczne kanałów, co, w połączeniu z wysoką temperaturą tworzywa, zwiększa wydajność procesu (tabl. 3.9). Przewężki, jeżeli są, powinny być duże, gdyż w przeciwnym przypadku występują trudności w wypełnianiu gniazda i uzupełnianiu ubytków objętości tworzywa.

Wtryskiwanie wysokotemperaturowe znajduje zastosowanie do wytwarzania przedmiotów grubościennych (grubość ścianek może dochodzić do 30 mm i więcej) o dużych wymaganiach co do wymiarów, kształtu i położenia. W przypadkach porównywalnych czas cyklu procesu wtryskiwania wysokotemperaturowego jest jednak dłuższy, zazwyczaj o kilkanaście procent, od czasu wtryskiwania konwencjonalnego.

Charakterystyka procesu wtryskiwania wysokotemperaturowego wyprasek z PA 6 (Tarnamid T-27) w kształcie krążka o średnicy 156 mm z zastosowaniem formy jednogniazdowej z kanałem centralnym stożkowym 6,7/8,5 mm bez przewężki [3.152]

Grubość wypraski, mm	Temperatura cylindra, °C	Ciśnienie, MPa		Masa wyprasek, g	Wydajność procesu, kg/h
		wypełniania	docisku		
15	200	50	100	338	40
25	220	50	100	547	41
35	230	50	100	764	47

3.3. Prasowanie

Prasowanie jest metodą przetwórstwa polegającą na z reguły cyklicznym wprowadzaniu tworzywa do zamykanego gniazda formującego, kohezyjnym łączeniu jego ziarn lub częściej jego uplastycznieniu i następnie stapianiu, w zamkniętym gnieździe, jego utwardzaniu bądź zestalaniu, i z kolei wyjęciu przedmiotu, zwanego w tym przypadku wypraską, z gniazda. Proces prasowania zachodzi w prasach lub bez ich pomocy, jednak zawsze z użyciem narzędzia, którym jest forma prasownicza mająca gniazdo formujące. Literatura dotycząca prasowania jest bogata, choć w dużej części przestarzała; z książek w języku polskim, w całości poświęconych prasowaniu lub w których prasowanie jest stosunkowo szeroko omawiane, należy wymienić prace oznaczone numerami [3.50, 3.97, 3.98, 3.135, 3.193]. Ta metoda przetwórstwa należy do najstarszych; w latach dwudziestych i trzydziestych, a w niektórych państwach znacznie dłużej, była dominującą metodą przetwórstwa. Znaczenie prasowania z upływem czasu malało. Prasowanie wypierane było głównie przez bardziej wydajne i ekonomiczne wtryskiwanie. W ostatnich kilkunastu latach obserwuje się jego powrót, ale już w rozwiązaniach niekonwencjonalnych i specjalnych.

Tworzywo wejściowe do procesu prasowania może być w stanie stałym i wówczas ma postać proszku, tabletek, arkuszy oraz może być w stanie plastycznym bądź ciekłym. Tworzywo wejściowe, w kształcie proszku i tabletek, a także arkuszy, składające się z żywicy utwardzalnej i składników dodatkowych, np. napełniacza, środka barwiącego i smarującego, nosi często nazwę *tłoczywa*. Można więc mówić o tłoczywie fenolowym, aminowym, mocznikowym, poliestrowym, epoksydowym, silikonowym itp. Wielkością charakteryzującą ogólnie proces prasowania tłoczyw jest *współczynnik sprasowania tłoczyw K*, definiowany jako stosunek gęstości ρ_w wypraski do gęstości nasypowej ρ_n tłoczywa

$$K = \frac{\rho_w}{\rho_n} \tag{3.81}$$

Współczynnik K zależy głównie od rodzaju tworzywa, ciśnienia prasowania i rozmiarów ziarn tłoczywa, np. w przypadku proszku PTFE zawiera się w granicach 3,5 ÷ 7, rosnąc z powiększaniem się ciśnienia prasowania (5 ÷ 35 MPa) i zmniejszaniem rozmiarów ziarn (85 ÷ 1400 μm) [3.16].

Prasa do prasowania tworzyw ma z reguły napęd hydrauliczny i układ pionowy. W swej istocie nie różni się od pras hydraulicznych stosowanych do obróbki plastycznej metali, ale ma wyposażenie dodatkowe, np. układ grzejny formy prasowniczej.

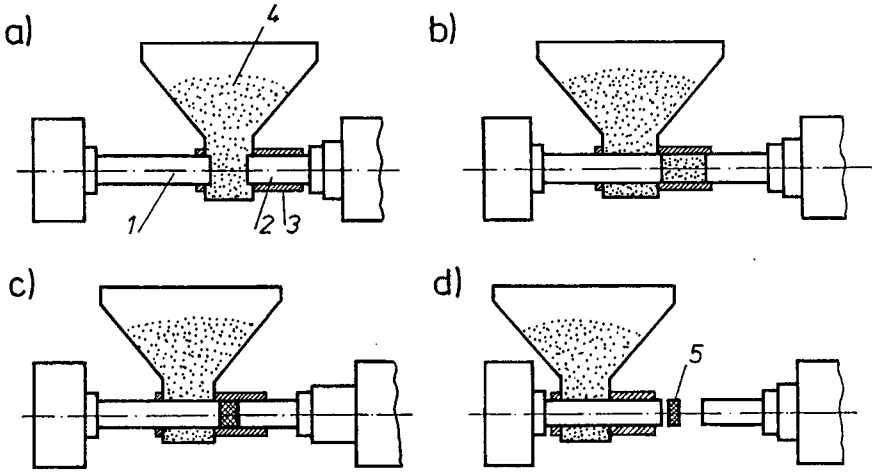
Prasowanie dzieli się na kilka odmian. Ważniejsze z nich są następujące: prasowanie wstępne, zwane tabletkowaniem, prasowanie wysokociśnieniowe, które dzieli się na tłoczne, przetłoczne i płytowe, oraz prasowanie niskociśnieniowe.

3.3.1. Prasowanie wstępne (tabletkowanie)

Do prasowania tłocznego i przetłocznego stosuje się chętnie jako tworzywo wejściowe tłoczywo w postaci tabletek. Daje to następujące korzyści: zwiększa szybkość i czystość operacji przy napełnianiu gniazda formy, zmniejsza zapylenie stanowiska pracy, zwiększa wysokość komory zasypowej formy poprzez zmniejszenie objętości tworzywa, co potania formę, zwiększa możliwość podgrzewania tworzywa, zwłaszcza pojemnościowego, i wreszcie zmniejsza błędy i anomalie przetwórcze wyprasek, wynikające z ich porowatości.

Istota procesu prasowania wstępnego (tabletkowania) polega na umieszczeniu odpowiedniej ilości proszku tłoczywa w gnieździe formującym, mającym najczęściej kształt walcowy, i wywarciu na niego ciśnienia $50 \div 200$ MPa w temperaturze normalnej lub podwyższonej do $80 \div 120°C$. W procesie prasowania zwiększa się gęstość tłoczywa, w przybliżeniu dwukrotnie, np. proszek tłoczywa fenolowego ma gęstość nasypową około 500 kg/m^3, natomiast tabletki z niego mają gęstość pozorną około 1000 kg/m^3 (gęstość wyprasek wynosi około 1400 kg/m^3). Pociąga to za sobą zmniejszanie porowatości [3.196]. Jeżeli chodzi o rozmiary tabletek, to najlepszym rozwiązaniem byłoby otrzymywanie tabletek o takich rozmiarach, aby jedna tabletka wystarczyła w danym cyklu prasowania.

Prasowanie wstępne (tabletkowanie) może odbywać się w układzie poziomym lub pionowym. W układzie poziomym, na ogół jednogniazdowym (rys. 3.86), otrzymuje się



Rys. 3.86. Schemat procesu prasowania wstępnego (tabletkowania) w układzie poziomym: a) dozowanie, b) wypełnianie, c) sprasowanie, d) usuwanie; *1* — prowadnica — dno matrycy (nieruchome), *2* — stempel ruchomy, *3* — boczna część matrycy (ruchoma), *4* — tłoczywo proszkowe w ruchomym zasobniku, *5* — tabletka

tabletki o większych rozmiarach, np. walce o średnicy 70 mm i większej, z wydajnością przeciętnie 1 sztuki na sekundę. Układ pionowy jest zazwyczaj wielogniazdowy (np. 12 i więcej gniazdowy) i służy do otrzymywania tabletek o mniejszych rozmiarach do φ 35 mm z względnie dużą wydajnością do 3 sztuk na sekundę.

Maszyny do prasowania wstępnego noszą nazwę *tabletkarek*. Dzielą się one na tabletkarki poziome o mechanicznym napędzie form, zwykle mimośrodowym, i o napędzie hydraulicznym oraz na tabletkarki pionowe, na ogół obrotowe, o rolkowo-krzywkowym napędzie form.

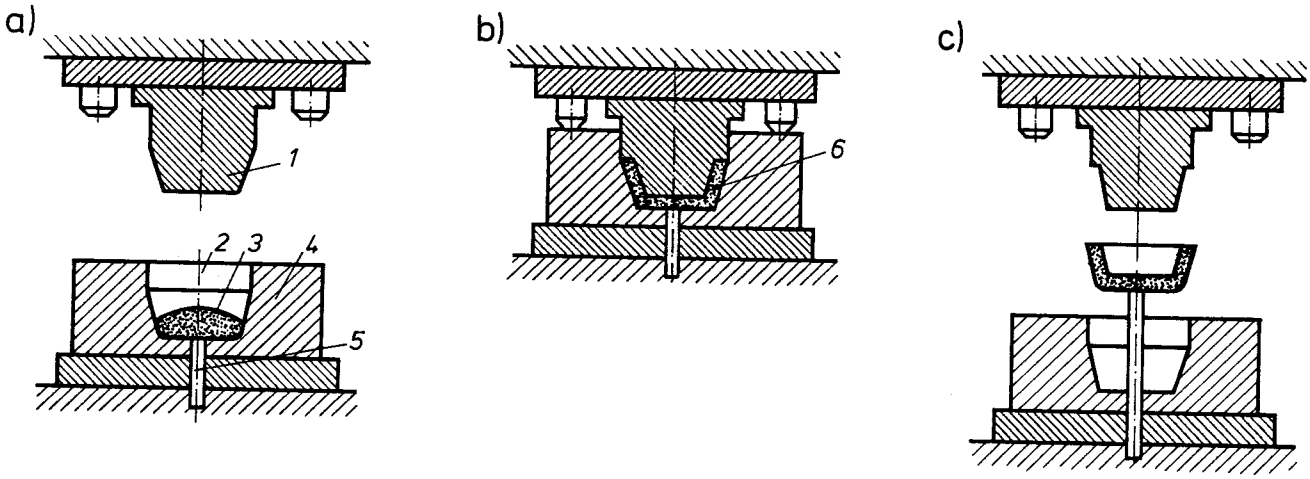
3.3.2. Prasowanie wysokociśnieniowe

Prasowanie wysokociśnieniowe — jak już podano — dzieli się na tłoczne, przetłoczne i płytowe.

Prasowanie tłoczne

Cykl procesu prasowania tłocznego składa się w istocie z następujących faz (rys. 3.87):

a) bezpośrednie napełnianie gniazda formy prasowniczej (*2*) ilością tworzywa — tłoczywa (*3*), w stanie stałym, na ogół w kształcie proszku lub tabletek bądź rzadziej w stanie plastycznym, potrzebną do uzyskania wypraski (*6*) — faza zwana krótko *napełnianiem*,



Rys. 3.87. Schemat procesu prasowania tłocznego: a) napełnianie gniazda, b) forma zamknięta, c) wypychanie wypraski; *1* — stempel, *2* — gniazdo formujące, *3* — tłoczywo, *4* — matryca, *5* — wypychacz, *6* — wypraska prasownicza

b) zamykanie formy, uplastycznianie tłoczywa, nieznaczne otwarcie formy w celu usunięcia ubocznych produktów polimeryzacji, czyli odgazowania (przeprowadza się je na ogół dla tworzyw utwardzalnych) — faza zwana krótko *zamykaniem*,

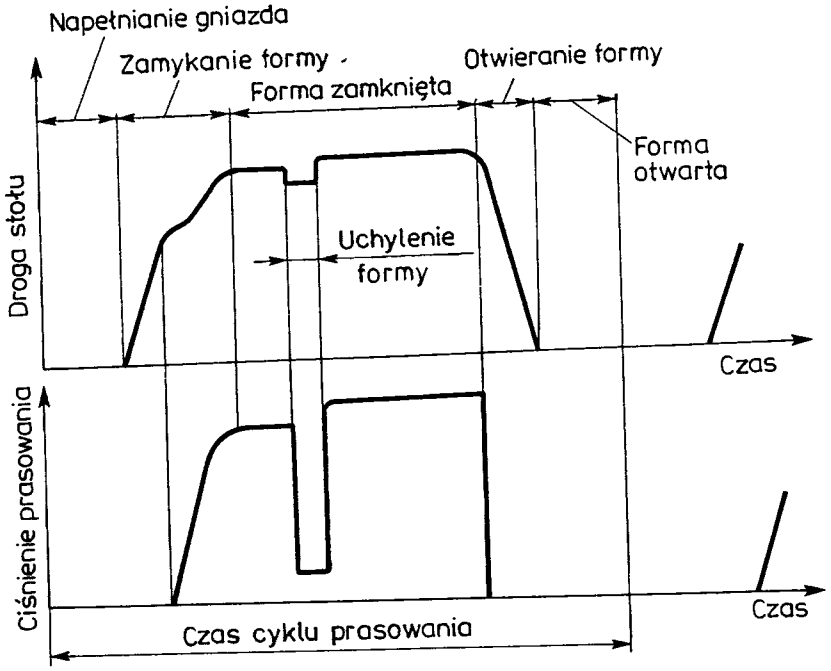
c) zamknięcie formy siłą całkowitą, stapianie tłoczywa i utwardzanie lub zestalanie wypraski — faza zwana krótko *sprasowaniem*,

d) zmniejszanie siły zamykającej formę, otwieranie formy i wypchnięcie wypraski prasowniczej z gniazda — faza zwana krótko *otwieraniem*,

e) zabiegi na otwartej formie, np. zakładanie rdzeni, zapraski, czyszczenie formy, powlekanie powierzchni gniazda środkiem przeciwprzyczepnym — faza zwana krótko

przerwą; może ona występować w każdym cyklu lub okresowo, co pewną liczbę cykli.

Cykl procesu prasowania tłocznego, obejmujący: napełnianie–zamykanie–sprasowanie–otwieranie–przerwę, może być przedstawiony graficznie, podobnie jak cykl procesu wtryskiwania (rys. 3.39). Zależność drogi stołu ruchomego prasy i ciśnienia panującego na czole stempla, zwanego *ciśnieniem prasowania*, od czasu prasowania pokazano w sposób poglądowy na rys. 3.88. Czas cyklu prasowania składa się z sumy czasów poszczególnych faz składowych, natomiast czas prasowania składa się z czasów nagrzewania tworzywa i jego utwardzania.



Rys. 3.88. Zależność drogi stołu prasy i ciśnienia prasowania od czasu prasowania tworzyw utwardzalnych

Ciśnienie prasowania zawiera się zazwyczaj w granicach 20 ÷ 90 MPa i zależy przede wszystkim od odległości drogi przepływu tworzywa w gnieździe, będącej bezpośrednio funkcją wysokości wypraski, grubości ścianki wypraski, kształtu wypraski i chropowatości powierzchni gniazda oraz w mniejszym stopniu od rozmiarów napełniacza. Nacisk wywierany na formę wyznacza się biorąc za podstawę rzeczywiste ciśnienie prasowania p_{rz}, czyli ciśnienie z uwzględnieniem wymienionych czynników. W przypadku najczęściej stosowanej prasy hydraulicznej górnocylindrowej, zasilanej cieczą o ciśnieniu p_c, z nurnikiem o średnicy D, z rzutu sił na oś pionową wynika

$$A\,p_{rz}\,k + R + F_{dł} = \frac{\pi D^2}{4}\,p_c + G \tag{3.82}$$

gdzie A oznacza pole powierzchni rzutu wypraski na płaszczyznę podziału formy, R — siłę wywieraną przez cylindry powrotne, $F_{dł}$ — siłę tarcia w dławicy, k — współczynnik uwzględniający tarcie stempla o matrycę ($k \approx 1{,}2$), G — ciężar nurnika, górnego stołu prasy i stemplowej części formy. Siłę R wywieraną przez cylindry powrotne wyznacza się ze wzoru

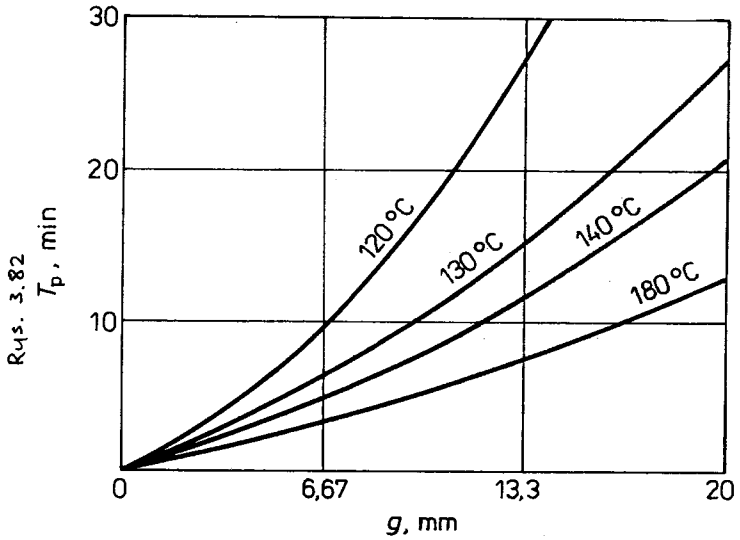
$$R = \frac{\pi d^2}{4} p_c i + F_{cp} \tag{3.83}$$

w którym d oznacza średnicę nurnika powrotnego, i — liczbę cylindrów powrotnych, F_{cp} — siłę tarcia w dławicy cylindrów powrotnych. Siłę tarcia $F_{dł}$ natomiast określa na ogół wzór

$$F_{dł} = \pi D\, h\, p_c \mu \tag{3.84}$$

w którym h oznacza wysokość uszczelnienia w dławicy, μ — współczynnik tarcia uszczelnienia o nurnik.

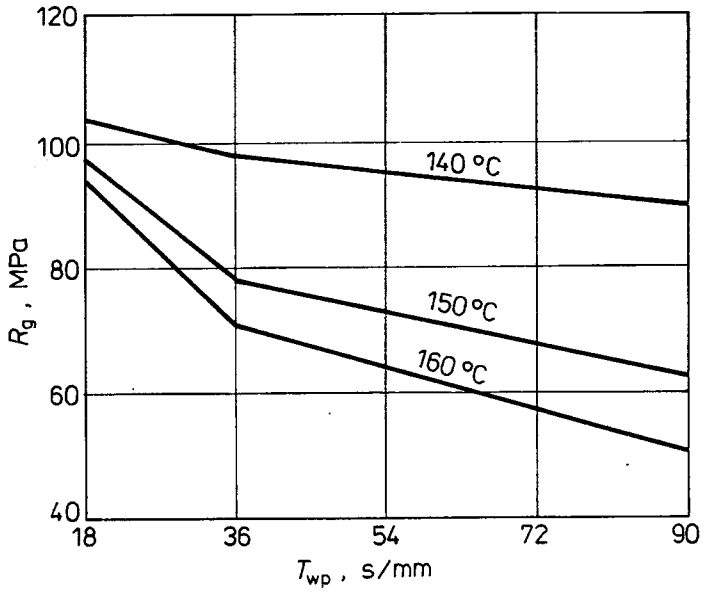
Temperatura prasowania zależy głównie od rodzaju tworzywa prasowanego; w przypadku tworzyw utwardzalnych zwykle wynosi 140 ÷ 200°C. Jest ona ściśle związana z czasem prasowania i grubością ścianki wypraski, a mianowicie wzrost temperatury z jednej strony skraca czas prasowania przy danej grubości ścianki, z drugiej zaś strony powoduje możliwość stosowania grubszych ścianek wypraski przy danym czasie prasowania (rys. 3.89). W związku z tym operuje się często pojęciem *względnego czasu prasowania*, czyli czasu odniesionego do grubości ścianki *wypraski tłocznej* (rys. 3.90).



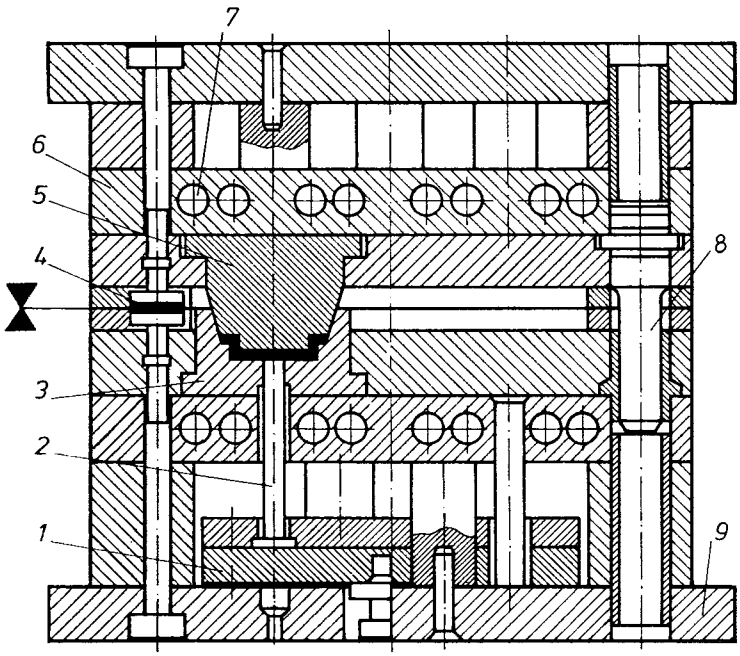
Rys. 3.89. Zależność czasu prasowania T_p od grubości g ścianki wypraski z PF napełnionego mączką drzewną w różnej temperaturze prasowania [3.50]

Forma do prasowania tłocznego, zwana krótko *formą tłoczną*, składa się na ogół z dwu podzespołów [3.30]: podzespołu mocowanego do ruchomego stołu prasy, zwanego podzespołem ruchomym, i podzespołu mocowanego do nieruchomego stołu prasy, zwanego podzespołem nieruchomym — podobnie jak forma wtryskowa (rys. 3.60). Podzespoły formy tłocznej składają się również z takich samych elementów co podzespoły formy wtryskowej. Na rysunku 3.91 przedstawiono przykładowo formę tłoczną do tworzyw utwardzalnych.

Zamknięcie formy tłocznej może być stykowe, teleskopowe, stykowo-teleskopowe i teleskopowo-stykowe (rys. 3.92). W przypadku formy o zamknięciu stykowym tworzywo wejściowe jest bezpośrednio wprowadzane wyłącznie do gniazda formującego, natomiast w przypadkach zamknięć pozostałych tworzywo wejściowe



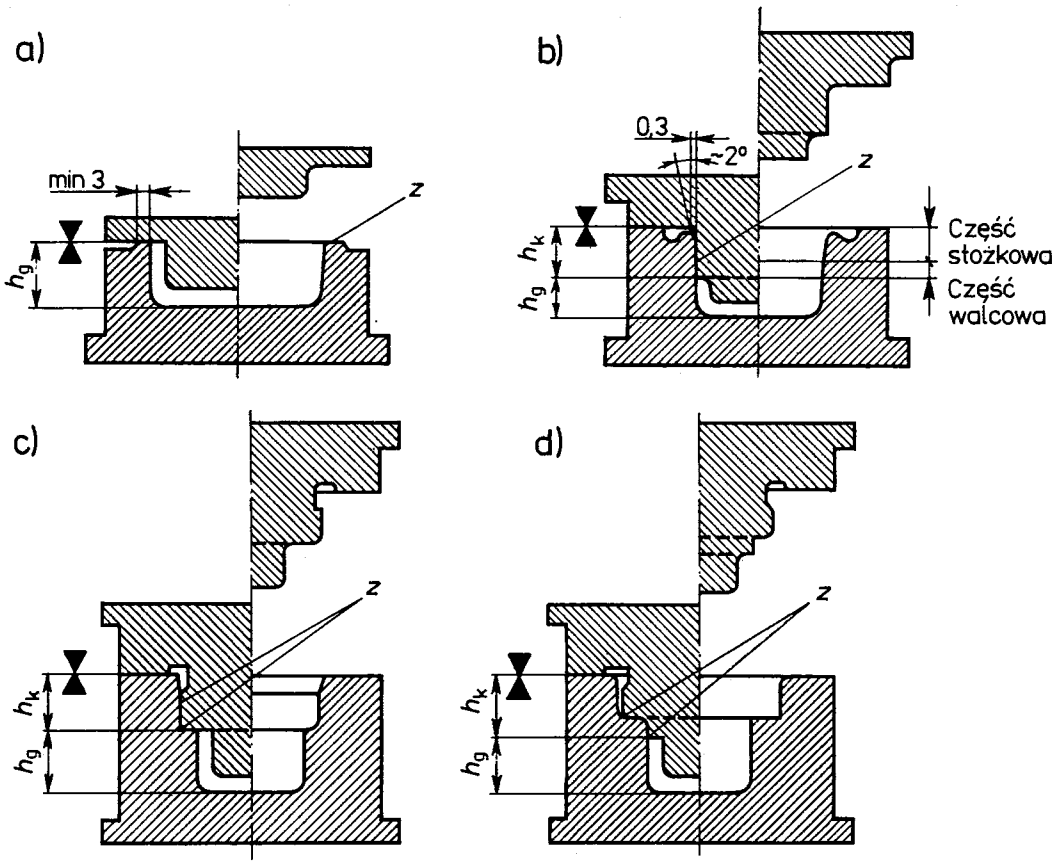
Rys. 3.90. Zależność wytrzymałości na zginanie R_g od względnego czasu prasowania T_{wp} tworzywa MF podgrzewanego promiennikowo w różnej temperaturze prasowania [3.75]



Rys. 3.91. Forma tłoczna do tworzyw utwardzalnych: *1* — płyta układu wypychania wypraski, *2* — wypychacz, *3* — matryca, *4* — wypraska, *5* — stempel, *6* — płyta grzejna podzespołu ruchomego, *7* — kanały grzejne, *8* — słup prowadzący, *9* — płyta mocująca podzespołu nieruchomego

wprowadza się nie tylko do gniazda, ale również w obszar znajdujący się nad nim — do komory zasypowej.

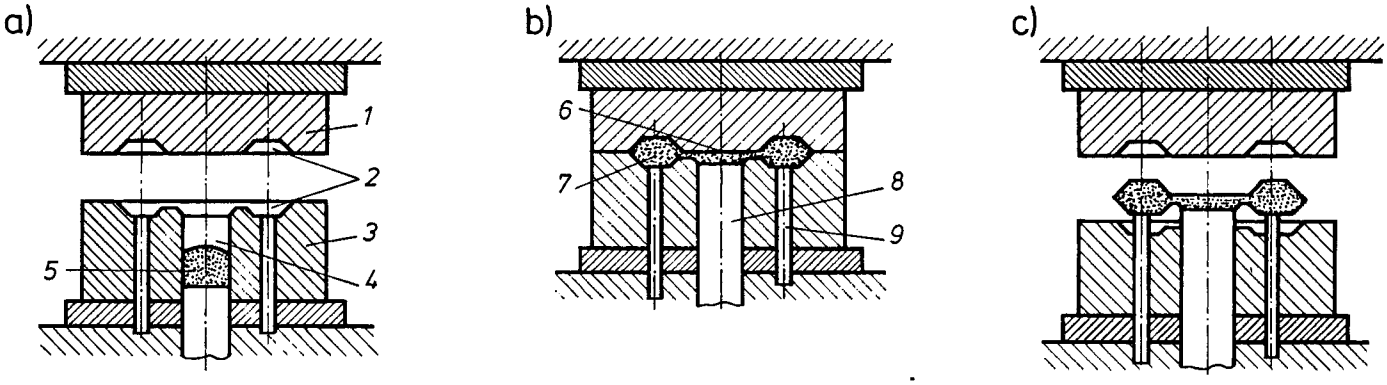
Prasowanie tłoczne jest stosowane obecnie jeszcze w starszych nierozwojowych rozwiązaniach bądź do wytwarzania wyprasek, którym nie stawia się wysokich wymagań jakościowych, i wówczas o stosowaniu tego prasowania decydują względy ekonomiczne (taniość). Współcześnie stosuje się je efektywnie do prasowania tworzyw napełnianych napełniaczem włóknistym, np. włóknem szklanym, utrudniającym prasowalność odmianą przetłoczoną lub wtryskiwalność, jak również w niektórych przypadkach prasowania niekonwencjonalnego i specjalnego (bliżej o nim w następnych punktach).



Rys. 3.92. Rodzaje zamknięcia formy tłocznej: a) stykowe, b) teleskopowe, c) stykowo-teleskopowe, d) teleskopowo-stykowe; h_g — wysokość gniazda formującego, h_k — wysokość komory zasypowej, Z — powierzchnia zamknięcia formy

Prasowanie przetłoczne

Prasowanie przetłoczne zostało wprowadzone do przemysłu już w 1930 r. jako udoskonalenie prasowania tłocznego. Różni się ono od niego istotnie sposobem doprowadzenia tłoczywa do gniazda formującego, mianowicie nie zostaje ono wprowadzone bezpośrednio do gniazda, lecz do komory przetłocznej (*4*), a z niej w stanie plastycznym jest przetłaczane pod działaniem tłoka przetłocznego — przetłocznika (*8*) przez kanał przetłoczny (*6*) do gniazda formującego (*2*) (rys. 3.93).



Rys. 3.93. Schemat procesu prasowania przetłocznego: a) napełnianie komory przetłocznej, b) forma zamknięta, c) wypychanie wypraski; *1* — stempel, *2* — gniazda formujące, *3* — matryca, *4* — komora przetłoczna, *5* — tłoczywo, *6* — kanał przetłoczny, *7* — wypraska, *8* — tłok przetłoczny (przetłocznik), *9* — wypychacz

W czasie prasowania (według schematu podanego na rys. 3.93) charakteryzującego się siłą zamknięcia formy P_s, siłą przetłaczania P_p i ciśnieniem prasowania p_{rz}, pole powierzchni A rzutu wypraski wraz z kanałami przetłocznymi na płaszczyznę podziału formy jest określone zależnością (rzut sił na oś pionową)

$$A = \frac{P_s - P_p}{p_{rz}} \tag{3.85}$$

Podczas przepływu tłoczywa z komory przetłocznej do gniazd formy, wskutek oporu przepływu, zachodzi spadek ciśnienia przetłaczania p_p szacowany na około 2/3, zatem należy w komorze przetłocznej wywołać ciśnienie

$$p_p = \frac{2}{3} p_p + p_{rz} \tag{3.86}$$

stąd

$$p_p = 3\ p_{rz} \tag{3.87}$$

zatem ciśnienie prasowania przetłocznego jest przeciętnie trzykrotnie wyższe od ciśnienia prasowania tłocznego w porównywalnych warunkach.

Przyjmując średnicę tłoka przetłocznego D_p, skok tłoka h_p, współczynnik tarcia tworzywa o ścianki komory przetłocznej μ_p, można napisać

$$P_p = \frac{\pi D_p^2}{4} p_p + \pi D_p h_p p_p \mu_p \tag{3.88}$$

co pozwala wyznaczyć średnicę tłoka przetłocznego

$$D_p = 2 \left[- h_p \mu_p + \sqrt{h_p^2 \mu_p^2 + \frac{P_p}{\pi p_p}} \right] \tag{3.89}$$

Po uplastycznieniu tworzywa wejściowego i dokładnym napełnieniu komory przetłocznej, objętość V tłoczywa przetłaczanego wynosi

$$V = k_p \frac{\pi D_p^2}{4} h_p \tag{3.90}$$

gdzie k_p oznacza współczynnik uwzględniający objętość tłoczywa znajdującego się w kanałach przetłocznych ($k_p \approx 1{,}1$). Masa tłoczywa przetłaczanego wynosi natomiast

$$m = V \rho(t) \tag{3.91}$$

gdzie $\rho(t)$ oznacza gęstość tłoczywa w temperaturze prasowania.

Zależność (3.90) pozwala na wyznaczenie skoku tłoka przetłocznego

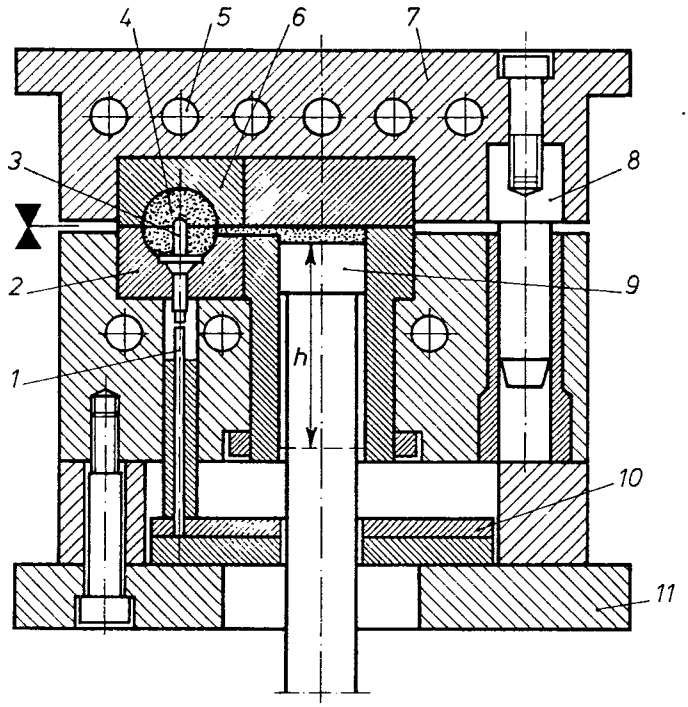
$$h_p = \frac{4V}{\pi k_p D_p^2} \tag{3.92}$$

Na czas prasowania składa się czas nagrzewania tworzywa, czas przetłaczania i czas utwardzania w gnieździe zamkniętej formy. Dla wyprasek małych o cienkich ściankach czasy cyklu prasowania przetłocznego i tłocznego są zbliżone, natomiast dla wyprasek większych i grubościennych czas cyklu prasowania przetłocznego jest nawet o 50÷70% krótszy niż prasowania tłocznego. Na skutek stosunkowo równomiernie rozłożonych sił w tworzywie podczas prasowania przetłocznego istnieje możliwość

stosowania w tej odmianie prasowania nawet dość delikatnych rdzeni i zaprasek bez obawy ich uszkodzenia.

Wypraski przetłoczne odznaczają się na ogół korzystniejszymi właściwościami mechanicznymi i elektrycznymi oraz mają większe walory estetyczne niż wypraski tłoczne. Wynika to z względnie równomiernego utwardzania wypraski i pewnej orientacji napełniacza i makrocząsteczek, spowodowanej przepływem tworzywa w procesie prasowania przetłocznego.

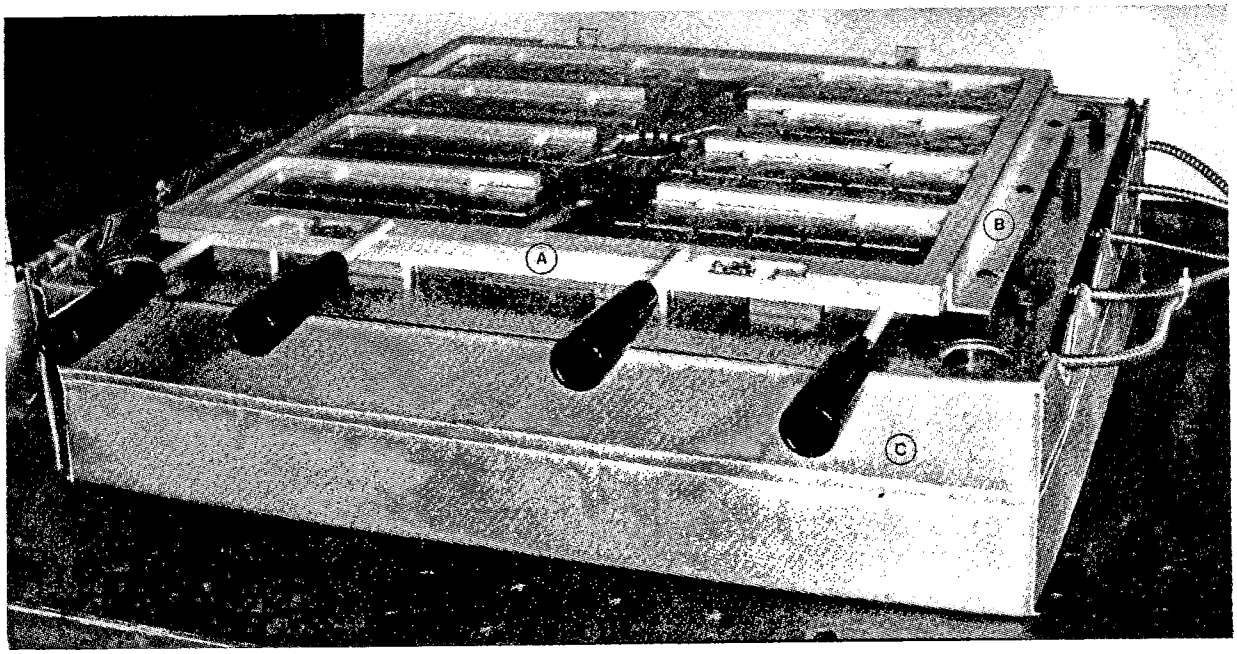
Forma do prasowania przetłocznego [3.30], zwana *formą przetłoczną*, składa się w istocie z takich samych podzespołów, układów i elementów co forma tłoczna (rys. 3.91) i forma wtryskowa (rys. 3.60), z tą różnicą, że ma komorę przetłoczną. Na rysunku 3.94 pokazano przykładowo formę przetłoczną do tworzyw utwardzalnych.



Rys. 3.94. Forma przetłoczna do tworzyw utwardzalnych: *1* — wypychacz, *2* — matryca, *3* — zapraska, *4* — wypraska, *5* — kanały grzejne, *6* — matryca, *7* — płyta podzespołu ruchomego, *8* — słup prowadzący, *9* — tłok przetłoczny (przetłocznik), *10* — płyta układu wypychania wypraski, *11* — płyta mocująca podzespołu nieruchomego, *h* — wysokość komory przetłocznej

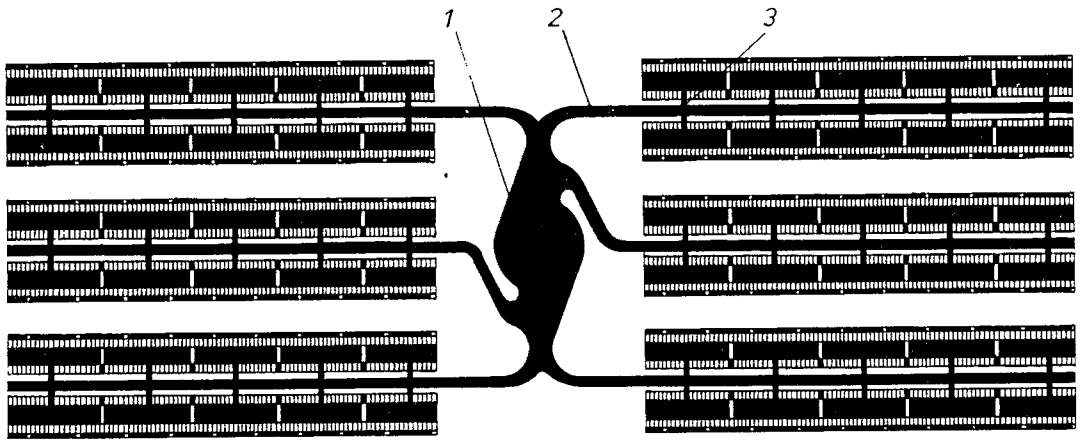
Prasowanie niekonwencjonalne, wspominane poprzednio, dotyczy procesu, w którym zapraskami są elementy elektroniczne, np. diody, tranzystory i układy scalone. Prasowanie to w przemyśle elektronicznym nosi nazwę *hermetyzacji przetłocznej* [3.149] i jest najbardziej rozpowszechnioną *metodą hermetyzacji* [3.112]. Do tego prasowania stosuje się głównie tworzywa epoksydowe i rzadziej silikonowe o specjalnych właściwościach, np. o bardzo dużej reaktywności, pozwalającej na stosowanie krótkiego czasu prasowania w granicach 90÷120 s, o bardzo dużej czystości, zwanej czystością jonową, i minimalnym poziomie promieniowania [3.39, 3.112].

Tworzywo wejściowe do hermetyzacji przetłocznej ma postać tabletek i jest podgrzewane pojemnościowo do temperatury 80÷90°C w czasie 40÷60 s [3.123]. Formy, ze względu na wydajność, są wielogniazdowe (rys. 3.95). Liczba gniazd



Rys. 3.95. Element formy 96-gniazdowej do hermetyzacji przetłocznej (MTI Corporation)

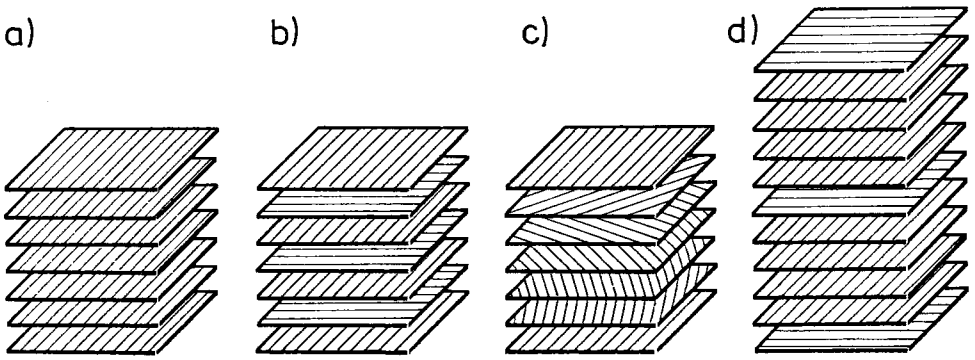
formujących bywa bardzo duża (stosuje się nawet formy kilkusetgniazdowe) i jest optymalizowana. W formach tych oddzielnym, ważnym problemem jest takie zaprojektowanie i wykonanie układu przepływowego, aby warunki wypełniania poszczególnych gniazd w gałęziach były w miarę jednakowe (rys. 3.96), przez co otrzymuje się wypraski o ustalonych wąskich tolerancjach wskaźników jakości. Prasy są zazwyczaj hydrauliczne, często z ruchomym dolnym stołem i wówczas układ przetłoczny umieszcza się nad nieruchomym górnym stołem prasy. Odznaczają się one regulowaną prędkością ruchu tłoka przetłocznego: dużą do momentu zetknięcia się jego czoła z tworzywem i mniejszą podczas dalszego przesuwania; pociąga to za sobą różne wartości ciśnienia przetłaczania — odpowiednio małą wartość i większą (5 ÷ 10 MPa). Prasy te są zautomatyzowane. Spotyka się również specjalne prasy z wieloma tłokami przetłocznymi, np. firmy Yamada (Japonia).



Rys. 3.96. Układ przepływowy formy wielogniazdowej do hermetyzacji przetłocznej zapewniający w miarę jednakowe warunki wypełniania gniazd w gałęziach, głównie poprzez jednakową długość dróg przepływu tworzywa: *1* — miejsce umieszczenia tabletki tworzywa, *2* — gałęzie kanałów (6 sztuk), *3* — kanały doprowadzające w liczbie równej liczbie gniazd (rozwiązanie holenderskiej firmy Arbo)

Prasowanie płytowe

Wysokociśnieniowe prasowanie płytowe stosuje się do wytwarzania płyt prostych i kształtowych na ogół z tworzyw utwardzających się w wyniku polimeryzacji kondensacyjnej [3.54]. Napełniaczem w tego rodzaju laminatach, zwanych również *nośnikiem*, są przede wszystkim arkusze tkaniny, papieru i forniru drzewnego, natomiast spoiwem łączącym się trwale w rezultacie adhezji z napełniaczem — żywica fenolowa, aminowa, mocznikowa, melaminowa itp. Arkusze napełniacza przesyca się odpowiednią mieszaniną żywicy z innymi składnikami (np. z katalizatorami) i układa jeden na drugim, zgodnie z żądanym ukierunkowaniem elementów makrostruktury, np. ukierunkowaniem włókien lub wątku bądź osnowy (rys. 3.97), wynikającym ze stopnia anizotropii płaskiej laminatu, według potrzeb użytkowych. Pakiet taki umieszcza się pomiędzy ogrzewanymi płytkami prasy, przymocowanymi do jej stołów. Zatem formę w tym przypadku stanowią tylko ogrzewane płyty, a gniazdo formujące — obszar pomiędzy nimi. Cykl prasowania płytowego jest w swej istocie taki, jak prasowania tłocznego tworzyw utwardzalnych. Jeżeli grubość pakietu jest mała, to można jednocześnie prasować kilka pakietów, stosując stalowe płyty przekładkowe między nimi.



Rys. 3.97. Możliwości układania arkuszy napełniacza, w zależności od ukierunkowania elementów ich makrostruktury, do prasowania płytowego laminatów: a) układ równoległy, b) układ poprzeczny, c) układ gwiaździsty, d) układ równoległy poprzecznie wzmocniony

Często arkusze napełniacza po przesyceniu poddaje się suszeniu, w czasie którego następuje odparowanie rozpuszczalnika, uzyskując *preimpregnaty*, zwane również krótko *prepregami*. Korzystne jest stosowanie tłoczyw arkuszowych (rozdz. 5, p. 5.5.9). Metody otrzymywania preimpregnatów i tłoczyw arkuszowych umożliwiają efektywne wytwarzanie z nich, w późniejszym procesie prasowania, przedmiotów o właściwościach w bardzo dużym stopniu powtarzalnych oraz umożliwiających stosowanie daleko posuniętej automatyzacji i robotyzacji, co ma duże znaczenie w przypadku produkowanych masowo wytworów przemysłu motoryzacyjnego, lotniczego i innych.

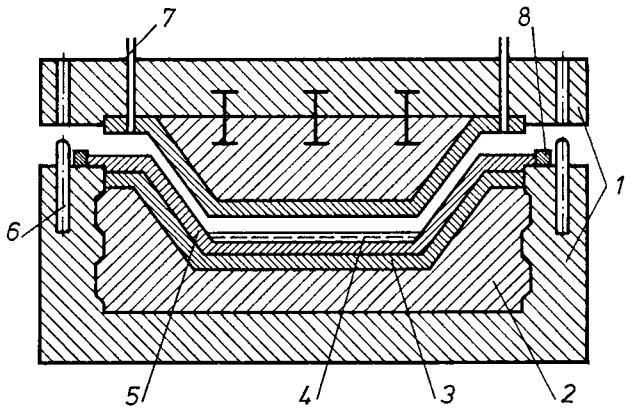
Po procesie prasowania brzegi płyt wyrównuje się i jednocześnie nadaje płytom ściśle określone wymiary. Operacje te wykonywane są metodami obróbki skrawaniem, np. przecinaniem lub frezowaniem.

3.3.3. Prasowanie niskociśnieniowe

Prasowaniem niskociśnieniowym nazywa się umownie proces, w którym ciśnienie prasowania nie przakracza (z nielicznymi wyjątkami) 2 MPa, a zwykle jest niższe. Stosuje się je głównie do tworzyw utwardzających się w wyniku polimeryzacji addycyjnej i kopolimeryzacji rodnikowej. Spoiwem są przede wszystkim żywice poliestrowe i epoksydowe z odpowiednimi składnikami, np. inicjatorem lub utwardzaczem, natomiast nośnikiem — napełniacze arkuszowe. Spoiwem mogą być również polimery uretanowe i wówczas proces prasowania często nosi nazwę RTM (ang. *Resin Transwer Molding*). Prasowanie tworzyw uretanowych nabiera coraz większego znaczenia [3.53, 3.110]. Prasowanie niskociśnieniowe może odbywać się w temperaturze normalnej oraz w temperaturze podwyższonej.

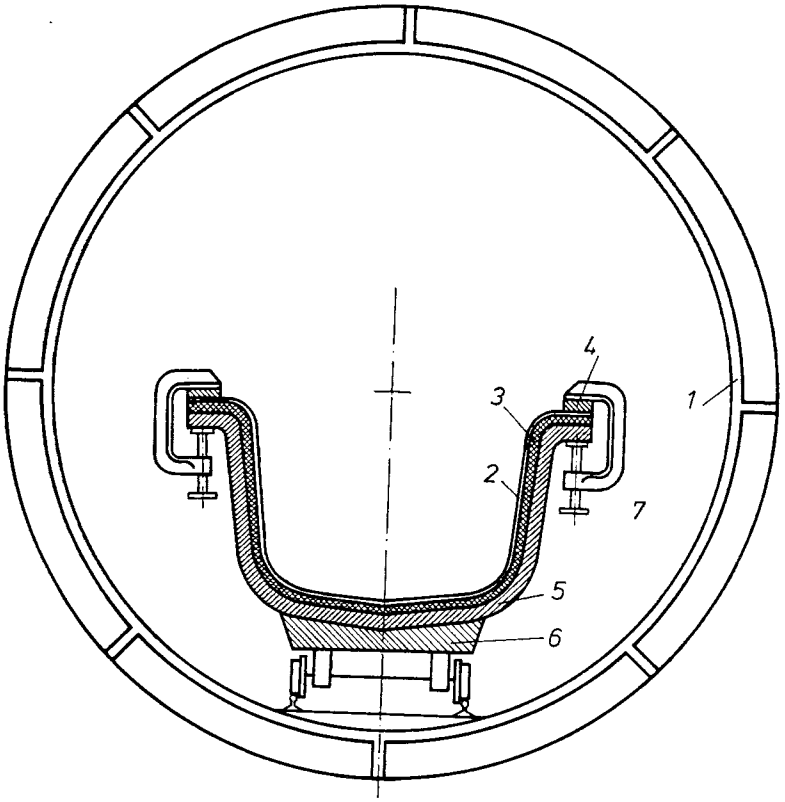
Prasowanie niskociśnieniowe laminatów w temperaturze normalnej polega zazwyczaj na ułożeniu w gnieździe formującym odpowiedniej liczby arkuszy napełniacza, zgodnie z żądanym ukierunkowaniem elementów makrostruktury (podobnie jak przy wysokociśnieniowym prasowaniu płytowym), następnie wprowadzeniu do gniazda mieszaniny żywicy z innymi niezbędnymi składnikami, zamknięciu formy, przez co przesyca się napełniacz, wywarciu ciśnienia oraz przeprowadzeniu odpowiedniego rodzaju polimeryzacji bądź kopolimeryzacji [3.91]. Chętnie stosuje się tłoczywa arkuszowe i preimpregnaty. Ze względu na niskie ciśnienie prasowania, prasowanie to można stosować do wytwarzania przedmiotów o dużych rozmiarach na specjalnych prasach górnocylindrowych o dużych stołach przesuwnych, np. pozwalających na mocowanie dwóch matryc przy jednym stemplu (firma Bürkle — Niemcy). Proces prasowania można również prowadzić bez użycia prasy, pod ciężarem podzespołu ruchomego formy (rys. 3.98). Można wreszcie prasować laminaty wykorzystując ciśnienie powietrza:

— obniżone, wówczas proces ten nazywa się *prasowaniem pneumatycznym próżniowym*,

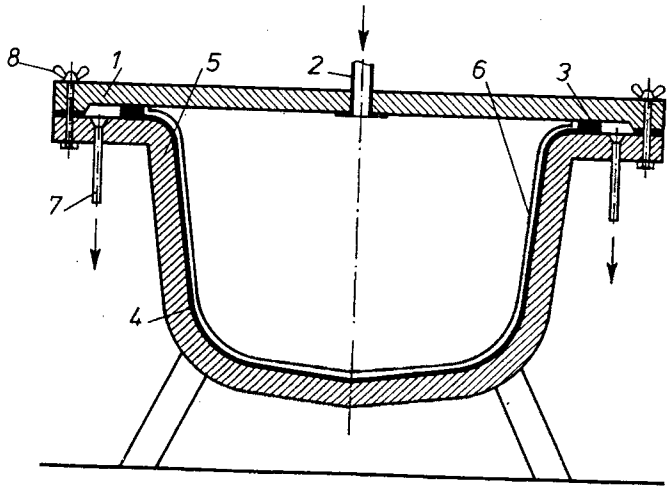


Rys. 3.98. Schemat procesu prasowania niskociśnieniowego w temperaturze normalnej przedmiotów o dużych rozmiarach: *1* — obudowa żelbetowa formy, *2* — wypełnienie obudowy tworzywem, *3* — laminat poliestrowo-szklany, *4* — ciekła mieszanina żywicy z niezbędnymi składnikami, *5* — napełniacz arkuszowy, *6* — słupy prowadzące, *7* — odpływ nadmiaru ciekłej mieszaniny, *8* — uszczelki

— podwyższone, wówczas proces ten nosi nazwę *prasowania pneumatycznego normalnego* (rys. 3.99),
— jednocześnie obniżone i podwyższone, co nazywa się *prasowaniem pneumatycznym próżniowo-ciśnieniowym* (rys. 3.100).

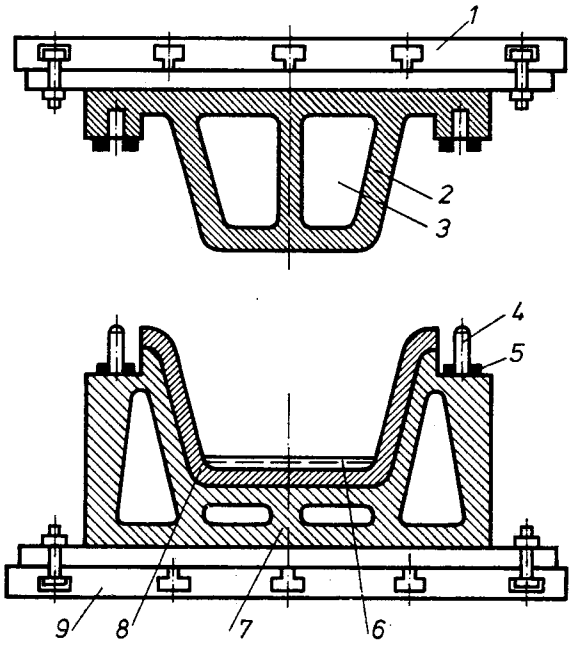


Rys. 3.99. Schemat procesu prasowania pneumatycznego normalnego: *1* — korpus komory z podwyższonym ciśnieniem powietrza, *2* — płat z folii, dawniej nazywany workiem, *3* — laminat, *4* — listwa uszczelniająca, *5* — gniazdo formy, *6* — wózek, *7* — zaciski śrubowe



Rys. 3.100. Schemat procesu pneumatycznego prasowania próżniowo-ciśnieniowego: *1* — płyta zamykająca, *2* — doprowadzenie sprężonego powietrza, *3* — uszczelka, *4* — laminat, *5* — gniazdo formy, *6* — płat z folii, dawniej nazywany workiem, *7* — odprowadzenie powietrza w celu wytworzenia podciśnienia, *8* — śruby zaciskowe

Prasowanie niskociśnieniowe laminatów w temperaturze podwyższonej (na ogół do 150°C) przebiega podobnie jak poprzednio, z tym, że forma ma grzejniki lub kanały grzejne (rys. 3.101). Prasy są górno- lub dolnocylindrowe [3.90] i odznaczają się dużymi powierzchniami stołów (np. prasy górnocylindrowe firmy Dieffenbacher — Niemcy; 1500 × 2000 mm) i regulowaną prędkością ruchu stołu: dużą (150÷300 mm/s) na początku zamykania formy i mniejszą (1÷20 mm/s) w końcowej fazie prasowania. W wyniku tej odmiany prasowania uzyskuje się przedmioty o zazwyczaj korzystniejszych właściwościach, pozwalają na to bowiem regulowane warunki prasowania. Zawartość szkła w laminatach wynosi w przypadku użycia mat około 60% mas., a przy użyciu tkanin nawet 70% mas., co zwiększa wytrzymałość laminatu. Trzeba dodać, że zawartość szkła w laminatach wytwarzanych w temperaturze normalnej wynosi odpowiednio do 45% oraz do 65%.



Rys. 3.101. Schemat prasowania niskociśnieniowego w temperaturze podwyższonej: *1* — stół ruchomy prasy, *2* — stempel, *3* — kanały grzejne, *4* — słupy prowadzące, *5* — elementy ustalające, *6* — ciekła mieszanina żywicy z niezbędnymi składnikami, *7* — matryca, *8* — napełniacz arkuszowy, *9* — nieruchomy stół prasy

Za pomocą prasowania niskociśnieniowego w temperaturze podwyższonej można również wytwarzać laminaty porowate. Na przykład [3.89] w przypadku poliestrowych laminatów węglowych jako porofor stosuje się wodny roztwór chlorowodorku *t*-butylohydrazyny z chlorkiem żelaza. Temperatura prasowania wynosi 60°C, a czas około 1 h. Laminaty te stosuje się m.in. na deski surfingowe, łopaty śmigieł siłowni wiatrowych i spoilery samochodowe.

3.4. Laminowanie

Laminowanie polega na trwałym łączeniu adhezyjnym warstw napełniacza (nośnika) w kształcie arkuszy, taśm lub włókien za pomocą spoiwa, na trwałym łączeniu kohezyjnym warstw tworzywa na ogół w kształcie taśm, bądź na trwałym łączeniu

adhezyjnym folii polimerowych ze sobą lub z foliami z innych materiałów. Laminowanie przebiega bez wywierania ciśnienia, zarówno w temperaturze normalnej, jak i podwyższonej (z zasady nie wyższej niż 150°C), często przy zastosowaniu promienników podczerwieni jako źródeł ciepła. Jako napełniacz (nośnik) stosuje się arkusze tkaniny lub maty, taśmy oraz włókna: szklane, węglowe, polimerowe, azbestowe, bawełniane, a niekiedy również borowe, metalowe i krzemowe. Jako spoiwa stosuje się substancje z różnych polimerów wykazujących znaczną adhezję do wymienionych napełniaczy lub sam polimer, duże znaczenie ma jednak stosowanie polimerów utwardzających się w procesie polimeryzacji addycyjnej lub kopolimeryzacji rodnikowej, głównie epoksydów i poliestrów. Proces laminowania przeprowadza się bez specjalnych maszyn lub za ich pomocą, jednak na ogół przy użyciu narzędzia, którym jest forma do laminowania lub przeciągadło. Formy te dzielą się ogólnie na wewnętrzne i zewnętrzne. Formy wewnętrzne mają wklęsłe gniazdo formujące, a formy zewnętrzne — gniazdo wypukłe. Przykładem przedmiotów laminowanych w formach wewnętrznych są kadłuby łodzi i wanny, natomiast przykładem przedmiotów laminowanych w formach zewnętrznych — rury i zbiorniki.

Metoda laminowania dzieli się, ze względu na kształt stosowanego napełniacza lub tworzywa wejściowego i stan spoiwa, na następujące główne odmiany:

a) *laminowanie natryskowe*, w którym napełniacz ma kształt włókien krótkich, a spoiwo jest w stanie ciekłym,

b) *przeciąganie i laminowanie specjalne*, w którym napełniacz jest w kształcie włókien długich, a spoiwo w stanie ciekłym,

c) *nawijanie*, w którym napełniacz ma kształt włókien długich lub taśm z włókien, a spoiwo znajduje się w stanie ciekłym bądź stałym, lub tworzywo wejściowe jest w kształcie taśm w stanie plastycznym, otrzymywanym innymi metodami przetwórstwa,

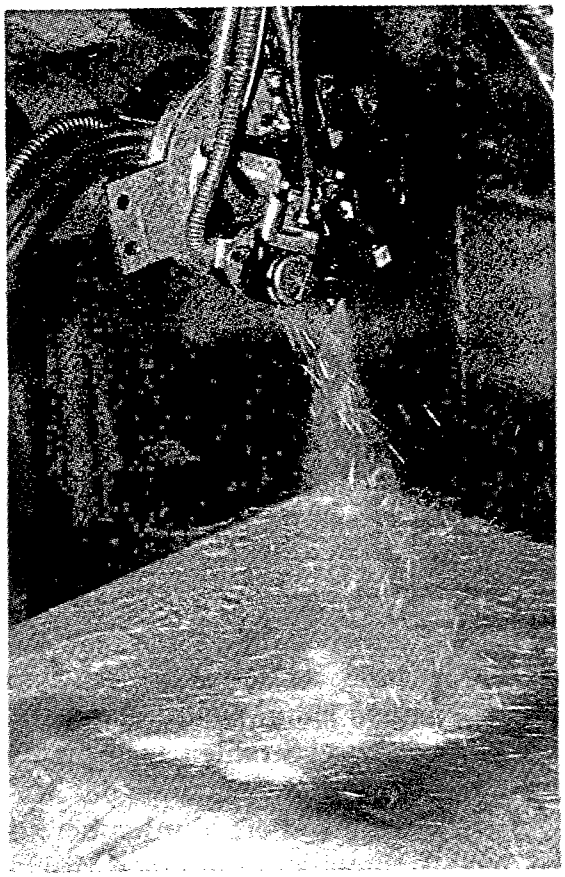
d) *nakładanie*, w którym napełniaczem są arkusze, spoiwem zaś substancje w stanie ciekłym lub stałym.

Istotą laminowania specjalnego jest ściśle określone układanie swobodne długich włókien na warstwie spoiwa wylanej na folię; włókna mogą być układane głównie liniowo lub pętlicowo, w obu przypadkach płasko. Laminowanie to stosuje się do wytwarzania tłoczyw arkuszowych.

3.4.1. Laminowanie natryskowe i przeciąganie

Laminowanie natryskowe, wprowadzone w 1957 r., polega na nakładaniu na powierzchnię gniazda formującego mieszaniny spoiwa i włókien krótkich. Klasyczne laminowanie natryskowe przeprowadza się za pomocą maszyny, często przewoźnej, która składa się z dwóch podstawowych zespołów: zespołu podawania spoiwa i włókien oraz pistoletu natryskowego. Spoiwo jest podawane przewodami do pistoletu wskutek wytworzonego za pomocą sprężarki ciśnienia powierza, panującego w zbiornikach ze składnikami spoiwa. Do pistoletu jest również podawane włókno długie, najczęściej szklane w postaci rowingu i cięte na odcinki o odpowiedniej długości (3 ÷ 5 cm) przy użyciu krajarki wmontowanej w pistolet. Z pistoletu przez jedną lub

dwie dysze spoiwo jest natryskiwane w kierunku powierzchni i jednocześnie z innej dyszy wyrzucane jest włókno krótkie. Spoiwo i włókno miesza się wzajemnie w czasie lotu i osadza na powierzchni w postaci warstwy o grubości jednorazowo do 2 mm, gdzie następuje proces utwardzania (rys. 3.102). Ciśnienie spoiwa wynosi 0,15÷0,6 MPa, zawartość włókien w laminacie dochodzi do 50%, a wydajność 5÷20 kg laminatu na minutę [3.91].

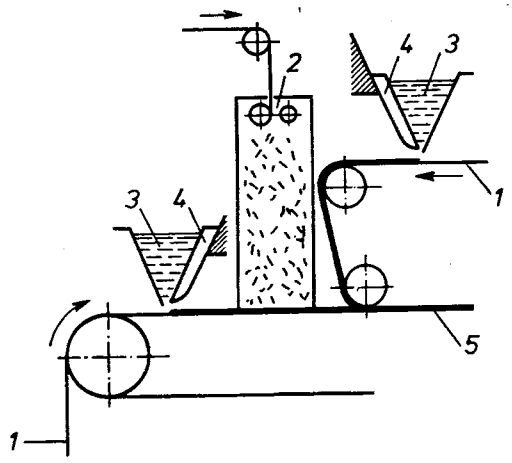


Rys. 3. 102. Proces laminowania natryskowego klasycznego z jedną dyszą do spoiwa i z jedną dyszą do włókna krótkiego [3.10]

W przypadku tworzyw poliestrowych, według J. G. Mohra i współpracowników [3.120] można wyróżnić kilka rozwiązań procesu laminowania natryskowego, mających swoje zalety i wady determinujące zastosowanie; w rozwiązaniu tradycyjnym są dwa zbiorniki ze spoiwem — jeden z mieszaniną żywicy i inicjatora, drugi z mieszaniną żywicy i przyspieszacza. W rozwiązaniu nowszym również są dwa zbiorniki — jeden z mieszaniną żywicy i przyspieszacza, drugi tylko z inicjatorem.

Laminowanie natryskowe stosuje się w produkcji wielkomasowej do wytwarzania przedmiotów o znacznych rozmiarach, a także w budownictwie do natryskiwania dachów, tuneli, ścian kanałów, zbiorników itp.

Podstawową odmianą laminowania natryskowego jest laminowanie zwane *sekwencyjnym*. Jego istotę pokazano na rys. 3.103. Różni się ono od klasycznego laminowania natryskowego tym, że natryskuje się tylko włókno, natomiast spoiwo nanosi się odrębnie dwoma warstwami przez wylewanie, przed i po natryskiwaniu włókien. Laminowanie sekwencyjne jest podstawową operacją przy otrzymywaniu tłoczyw

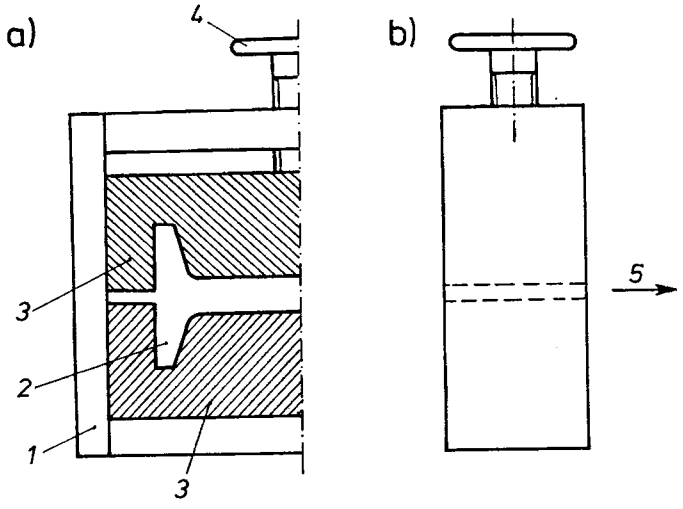


Rys. 3.103. Istota laminowania natryskowego sekwencyjnego: *1* — folia ochronna, np. folia PE, *2* — krajarka włókien, *3* — zbiornik ze spoiwem, *4* — listwa zgarniająca, *5* — tłoczywo arkuszowe

arkuszowych o wzmocnieniu jednolitym i hybrydowym. Bliższe wiadomości o otrzymywaniu tłoczyw arkuszowych są podane w rozdziale 5.

Przeciąganie polega na ciągłym przesycaniu włókien długich, np. rowingu, ciekłym spoiwem, uformowaniu przedmiotu, zwanego *kształtownikiem laminowanym* lub *profilem laminowanym*, utwardzeniu bądź zestaleniu i rozdzieleniu go na odcinki. Za pomocą tej odmiany laminowania otrzymuje się kształtowniki o przekroju poprzecznym w kształcie koła, pierścienia, płaskownika, kątownika, ceownika, dwuteownika itp.

Uformowanie kształtownika następuje w narzędziu przetwórczym, zwanym *przeciągadłem*. Głównym jego elementem jest dysza formująca o kształcie i wymiarach w przekroju poprzecznym zbliżonych do kształtu i wymiarów kształtownika [3.91, 3.120]. Dysza może być ślizgowa, gdy pomiędzy laminatem i dyszą występuje tarcie ślizgowe (rys. 3.104), oraz toczna, jeżeli pomiędzy nimi zachodzi tarcie toczne. Drugie rozwiązanie jest nowsze i pozwala na przeciąganie z prędkością do 3 m/min [3.207]. Zazwyczaj stosuje się co najmniej dwa przeciągadła umieszczone liniowo: wstępne i zasadnicze.



Rys. 3.104. Przeciągadło: a) przekrój wzdłużny, b) wygląd z boku; *1* — obudowa, *2* — dysza formująca ślizgowa, *3* — dwie części korpusu, *4* — pokrętło regulacyjne, *5* — kierunek przeciągania

Proces przeciągania może odbywać się w układzie poziomym lub pionowym. Korzystniejszy jest układ pionowy, w którym ze względu na równomierniejszy rozkład spoiwa w stosunku do szkła w kształtowniku nie występuje spływanie spoiwa w dolne części przekroju poprzecznego kształtownika na etapie przed wprowadzeniem do przeciągadła. Zawartość szkła w kształtowniku jest znaczna i dochodzi do 75%, dlatego kształtowniki laminowane mają bardzo dużą wytrzymałość w kierunku wzdłużnym.

3.4.2. Nawijanie

Podczas nawijania następuje ułożenie, na powierzchni gniazda formującego formy zewnętrznej do nawijania, potrzebnej liczby warstw napełniacza, zwanego *nawojem*, wskutek ruchu obrotowego co najmniej formy. Nawoje mają postać pasm włókien długich (np. rowingu) lub taśm z włókien bądź taśm tworzywa w stanie plastycznym. Spoiwem są zazwyczaj tworzywa poliestrowe lub epoksydowe. Formę zewnętrzną do nawijania nazywa się często, ze względu na istotę procesu, krótko *rdzeniem*. Nawijanie przeprowadza się za pomocą maszyn do nawijania, zwanych *nawijarkami*. Odznaczają się one różnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi [3.64], w każdym jednak przypadku rdzeń wykonuje ruch obrotowy. Ze względu na kinematykę nawijanie dzieli się na [3.78, 3.91]:

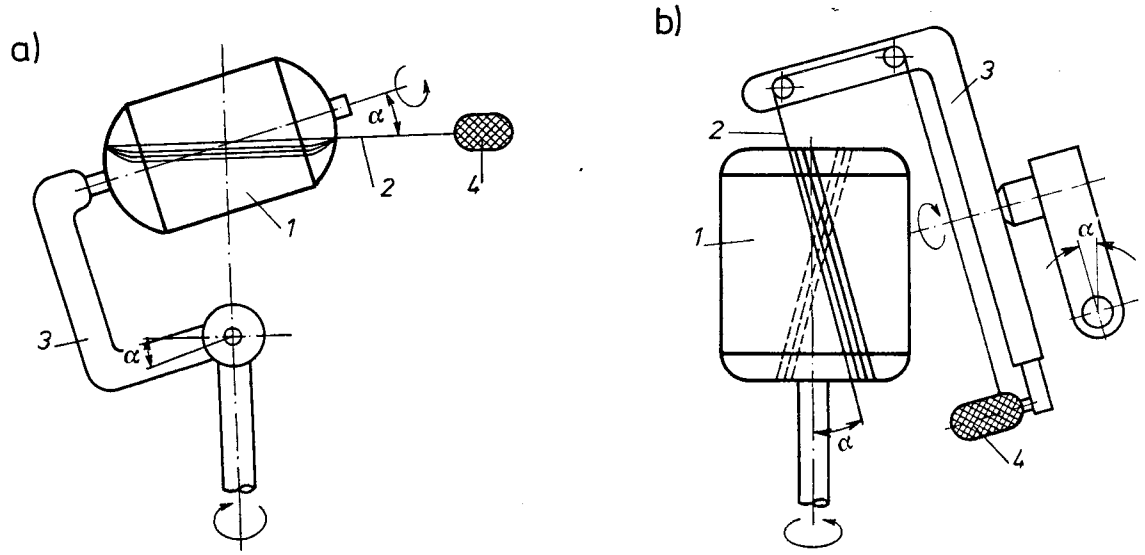
— planetarne, w którym w układzie rdzeń – nawój zachodzi złożony ruch obrotowy, czyli ruch planetarny; jest ono cykliczne,

— śrubowe, w którym w układzie rdzeń – nawój zachodzi prosty ruch obrotowy (kołowy) i jednocześnie poprzeczny ruch postępowo-zwrotny, czyli ruch śrubowy; może ono być cykliczne lub ciągłe.

Nawijanie planetarne

Na rysunku 3.105 pokazano dwa zasadnicze schematy procesu nawijania planetarnego zbiornika. W nawijaniu według rys. 3.105a pasmo lub taśma włókien (*2*) wstępnie przesyconych spoiwem są nawijane na rdzeniu (*1*), umocowanym na ramieniu obrotowym (*3*), wskutek jednoczesnych ruchów obrotowych rdzenia wokół osi pionowej (powolny) i wokół wzdłużnej osi własnej (szybki). Nawijanie to stosuje się do zbiorników o małych i średnich rozmiarach. W nawijaniu jak na rys. 3.105b oś wzdłużna rdzenia jest pionowa i wokół niej odbywa się wolny ruch obrotowy, natomiast drugi niezbędny do procesu, szybki ruch obrotowy wykonuje ramię (*3*) z nawojem włóknistym (*2*). Nawijanie to znajduje zastosowanie do zbiorników dużych. Znane jest również nawijanie planetarne zbiorników bardzo dużych z poziomą osią wzdłuż rdzenia. Podstawową wielkością geometryczną wpływającą na strukturę nawiniętego laminatu, a poprzez to na jego właściwości, jest kąt nawijania α zawarty pomiędzy osią wzdłużną rdzenia a kierunkiem ruchu nawoju (*2*) z głowicy do nawijania (*4*). Kąt nawijania planetarnego ma przeciętnie wartość kilkunastu $(\pi/180)$ rad. Prędkość nawijania jest duża, do 3 m/s.

Przesycenie wstępne włókien spoiwem następuje w głowicy do nawijania przed ułożeniem na rdzeniu i nazywa się *preimpregnacją mokrą*, a włókna na odcinku



Rys. 3.105. Schemat procesu planetarnego nawijania zbiornika: a) z ruchem planetarnym rdzenia, b) z ruchem obrotowym rdzenia i nawoju; *1* — rdzeń do nawijania, *2* — włókno nawijane, *3* — ramię obrotowe, *4* — głowica do nawijania

pomiędzy głowicą i rdzeniem — preimpregnatem mokrym, lub stosuje się włókna wcześniej oddzielnie preimpregnowane suche, co z kolei nosi nazwę *preimpregnacji suchej*. Głównymi zaletami preimpregnacji mokrej jest stosowanie materiałów w najprostszej i najtańszej postaci oraz dobre wyciśnięcie pęcherzy powietrza z laminatu, natomiast wadami — straty skapującego spoiwa, ograniczona prędkość nawijania ze względu na możliwości przesycenia i występowanie rozbryzgów spoiwa oraz pogarszanie warunków ochrony zdrowia pracowników. W przypadku preimpregnacji suchej jest niemal całkowicie odwrotnie. Zalety preimpregnacji suchej (wady preimpregnacji mokrej) przeważają i jest ona coraz częściej stosowana. Przy stosowaniu preimpregnatów suchych, konieczne jest ich nagrzewanie (np. w głowicy) przed nawinięciem w celu przeprowadzenia w stan plastyczny.

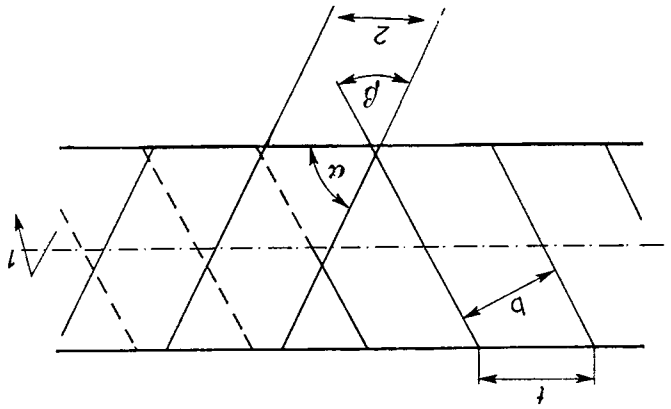
W każdym przypadku stosuje się naciąg włókien siłą o wartości $0{,}5 \div 5$ N na jedno pasmo, powodujący chwilowe dociśnięcie włókien i ich dalsze przesycenie, przez co uzyskuje się przedmioty o większym udziale szkła z mniejszą ilością pęcherzy powietrza, a zatem korzystniejsze wytrzymałościowo. Utwardzenie na ogół przeprowadza się w temperaturze podwyższonej już w czasie procesu nawijania, nagrzewając laminat od zewnątrz zwykle promiennikowo, a przy przedmiotach o grubych ściankach i przy preimpregnacji suchej — często również nagrzewa się rdzeń.

Proces nawijania kończy wyjęcie rdzenia z wnętrza przedmiotu. Konstrukcja i technologia rdzenia stanowią oddzielne i ważne problemy. Rdzeniom stawia się wymagania szczególne [3.150], a koszty rdzenia są znaczne, niekiedy przekraczające koszty przedmiotu. Rdzenie dzielą się na jedno- i wielokrotnego użycia. Rdzenie jednokrotnego użycia, po utwardzeniu laminatu, pozostają we wnętrzu przedmiotu związane z nim adhezyjnie albo są usuwane w sposób niszczący, np. mechaniczny (łamanie i kruszenie), cieplny (stapianie) oraz chemiczny (rozpuszczanie, wymywanie). Rdzenie wielokrotnego użycia składają się z segmentów, które po utwardzeniu

demontuje się i wyjmuje z wnętrza przedmiotu w stanie nadającym się do ponownego użycia.

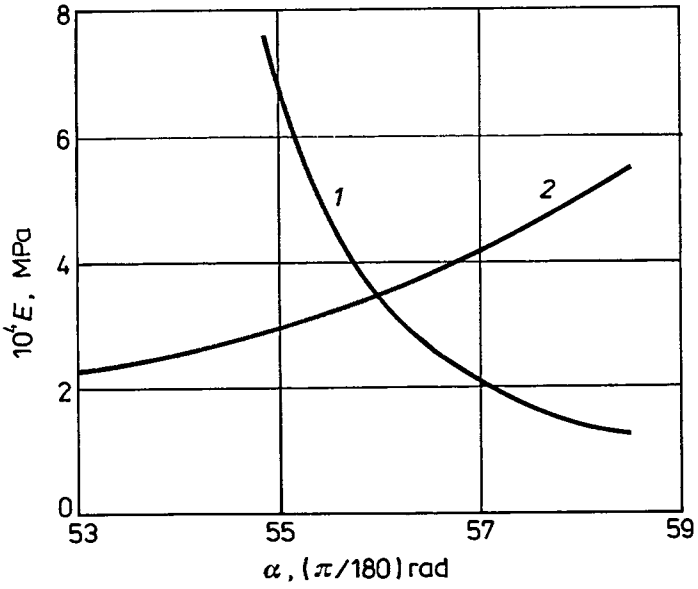
Nawijanie śrubowe

Istotę nawijania śrubowego z zastosowaniem nawoju włóknistego przedstawiono na rys. 3.106. Rdzeń wykonuje na ogół tylko ruch obrotowy wokół własnej osi, natomiast głowica do nawijania, z której wyprowadza się pasmo lub taśmę włókien przesyconych



Rys. 3.106. Schemat procesu nawijania śrubowego rury z użyciem pasma lub taśmy włókien: *1* — ruch obrotowy rdzenia walcowego, *2* — ruch postępowo-zwrotny nawoju, *t* — skok nawoju, *b* — szerokość nawoju, α — kąt nawijania, β — kąt skrzyżowania

spoiwem,wykonuje ruch postępowo-zwrotny. Do podstawowych wielkości geometrycznych należy nie tylko kąt nawijania α, ale również kąt skrzyżowania β. Kąt nawijania zawiera się w granicach od $\alpha_{min} = (5\pi/180)$ rad do $\alpha_{max} = (85\pi/180)$ rad. Zmniejszenie kąta nawijania powoduje wzrost współczynnika sprężystości wzdłużnej i wytrzymałości w kierunku wzdłużnym (osiowym), a spadek obu wielkości — w kierunku obwodowym (rys. 3.107). Dotyczy to również nawijania planetarnego. Wytrzymałość osiowa jest proporcjonalna do wyrażenia $\sin^2\alpha$, a wytrzymałość

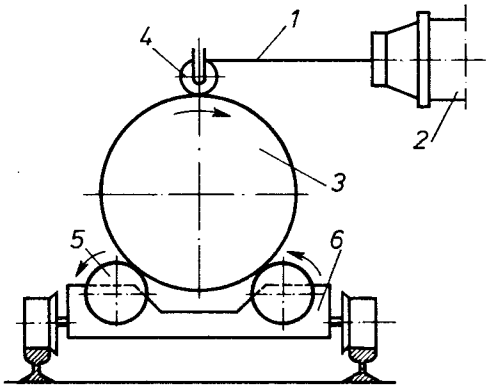


Rys. 3.107. Zależność współczynnika sprężystości wzdłużnej E od kąta nawijania α podczas nawijania śrubowego: *1* — wzdłuż osi, *2* — wzdłuż obwodu (włókna szklane, spoiwo poliestrowe) [3.91]

obwodowa — do $\cos^2\alpha$ [3.91, 3.120]. Zwykle przyjmuje się stosunek obu wytrzymałości równy 2 i wówczas $\sin^2\alpha/\cos^2\alpha = \mathrm{tg}^2\alpha = 2$; stąd $\alpha = (54{,}7333\pi/180)$ rad. Kąt skrzyżowania zależy od średnicy rdzenia i szerokości nawoju, a mianowicie dla określonej średnicy im większa szerokość nawoju, tym większy kąt β, a dla danej szerokości nawoju im większa średnica, tym kąt β jest mniejszy. Pomiędzy wielkościami geometrycznymi i kinematycznymi oraz parametrami wzmocnienia nawiniętego przedmiotu istnieją ściśle określone związki; w przypadku przekładni mechanicznej łączącej ruch obrotowy rdzenia z ruchem postępowo-zwrotnym związki te podają J. Borkowski i A. Rumiński [3.17].

Wiadomości dotyczące przesycenia, utwardzania oraz konstrukcji i technologii rdzeni są w istocie takie same, jak w przypadku nawijania planetarnego. Trzeba jednak dodać, że spotyka się [3.57] nawijanie nawoju suchego i przesycanie go bezpośrednio na rdzeniu, np. przez umieszczenie rdzenia z nawojem w komorze o temperaturze podwyższonej i po ustalonym czasie nagrzewania wytworzenie podciśnienia (400 ÷ 700 Pa) oraz następnie zassanie spoiwa ze specjalnego zbiornika, powodujące przesycenie włókien i stopniowe przejście do niedużego nadciśnienia (do 0,2 MPa).

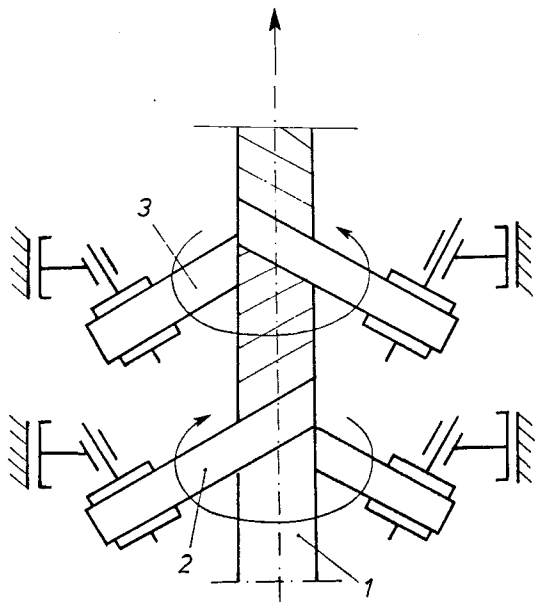
Nawijanie śrubowe można również stosować w odniesieniu do taśm tworzywa w stanie plastycznym, co pokazano przykładowo na rys. 3.108. Taśmę tworzywa termoplastycznego (*1*) otrzymaną bezpośrednio z wytłaczarki (*2*) układa się na rdzeniu



Rys. 3.108. Schemat procesu nawijania śrubowego rury z użyciem taśmy tworzywa termoplastycznego: *1* — taśma tworzywa, *2* — wytłaczarka, *3* — rdzeń walcowy (rura stalowa), *4* — rolka prowadząca taśmę tworzywa, *5* — wałki obracające rdzeń, *6* — wózek przesuwający rdzeń

walcowym (*3*) wskutek jednoczesnego ruchu obrotowego i prostoliniowego rdzenia. Na ogół rdzeniem jest rura stalowa, którą w ten sposób zabezpiecza się przed korozją [3.36]. Nawiniętą rurę można niezwłocznie owinąć śrubowo taśmą (np. szklaną) i nagrzać do temperatury uplastyczniania, uzyskując przez to łączenie kohezyjne taśm tworzywa i łączenie adhezyjne tworzywa z taśmą.

Zasadniczą odmianą nawijania śrubowego jest *nawijanie śrubowo-krzyżowe*, zwane również *oplataniem*. Polega ono na jednoczesnym nawijaniu na rdzeń czterech taśm nawoju; dwu nawojów prawoskrętnych i dwu nawojów lewoskrętnych lub odwrotnie (rys. 3.109). Nawoje mogą być układane bezpośrednio po sobie, jak na rysunku, bądź mogą być przedzielone laminowaniem. Często stosuje się kilka układów nawijania, usytuowanych liniowo. Nawijanie to stosuje się do wytwarzania wzmocnionych rur i węży.



Rys. 3.109. Istota nawijania śrubowo-krzyżowego: *1* — rdzeń związany adhezyjnie z laminatem lub wielokrotnego użycia (wyjmowany), *2* — nawijanie lewoskrętne, *3* — nawijanie prawoskrętne

3.4.3. Nakładanie

Nakładanie polega na ułożeniu na powierzchni gniazda formującego formy wewnętrznej lub zewnętrznej potrzebnej liczby warstw napełniacza arkuszowego uprzednio powleczonego spoiwem, czyli preimpregnowanego na mokro, lub na powlekaniu go bezpośrednio w gnieździe, chwilowym lekkim dociśnięciu warstw do siebie i przesyceniu ich, a następnie utwardzeniu.

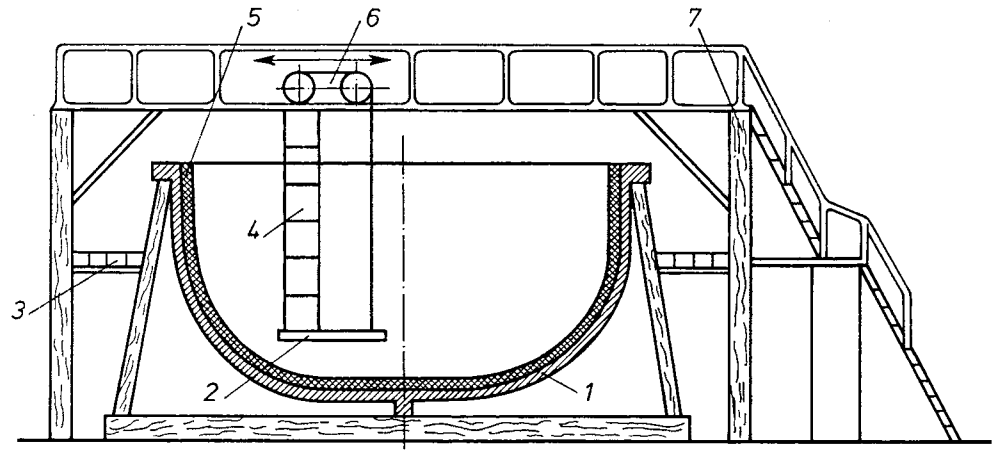
Dotychczas nakładanie najczęściej przeprowadza się za pomocą ręcznych narzędzi pracy, takich jak pędzle, wałki miękkie malarskie i metalowe z nacięciami, nożyce ręczne lub z napędem mechanicznym, naczynia pojemnikowe, mieszadła przenośne ręczne bądź z napędem mechanicznym. Można również stosować pistolety natryskowe [3.85, 3.91].

Na powierzchnię gniazda formującego nakłada się warstwę mieszaniny żywicy z potrzebnymi składnikami dodatkowymi, z których szczególne znaczenie ma środek nadający właściwości tiksotropowe i środek barwiący, o grubości 0,3 ÷ 0,5 mm, w celu uzyskania nieprzezroczystej warstwy wierzchniej przedmiotu o małej chropowatości powierzchni. Warstwa ta decyduje o wyglądzie zewnętrznym przedmiotu i nosi powszechnie nazwę *żelkot**. Trzeba zaznaczyć, że żelkot stosuje się również niekiedy przy laminowaniu natryskowym klasycznymm i przy nawijaniu. Następnie po utwardzeniu żelkotu nakłada się poszczególne warstwy wzmocnienia zgodnie z żądanym ukierunkowaniem jego elementów strukturalnych, chwilowo lekko je dociskając i przesycając oddzielnie. Stosuje się spoiwo jak w przypadku żelkotu, lecz bez środków tiksotropujących i barwiących. Na ostatnią warstwę laminatu przeznacza się zwykle cienką tkaninę powierzchniową. Po utwardzeniu brzegi przedmiotu obcina się — odpad ma szerokość około 2 cm.

---

* Od słów angielskich *gel coat*.

Nakładanie zaleca się stosować do otrzymywania przedmiotów skorupowatych o bardzo dużych rozmiarach, których wytwarzanie innymi metodami byłoby często wręcz niemożliwe lub bardzo kosztowne, do otrzymywania prototypów bądź przedmiotów o znacznych rozmiarach w krótkich seriach [3.101]. Na rysunku 3.110 przedstawiono przykładowo schemat procesu nakładania kadłuba dużej łodzi.



Rys. 3.110. Schemat procesu nakładania kadłuba dużej łodzi: *1* — forma wewnętrzna, *2* — pomost ruchomy, *3* — pomost stały, *4* — drabinka, *5* — kadłub łodzi, *6* — wózek, *7* — rusztowanie

3.5. Odlewanie

Przeprowadzenie tworzywa ze stanu ciekłego, plastycznego lub rzadziej stałego w stan stały bez stosowania ciśnienia bądź pod ciśnieniem na ogół nie przekraczającym 0,3 MPa, często o twardym gnieździe formującym w temperaturze normalnej lub podwyższonej, a następnie wyjęcie z gniazda przedmiotu, zwanego w tym przypadku *odlewem*, nosi nazwę odlewania. Jeżeli tworzywo wejściowe ma stan stały i postać granulek bądź proszku, to w gnieździe przeprowadza się je w stan ciekły, w którym wypełnia gniazdo, a następnie przeprowadza się je znowu w stan stały, nadając odlewowi żądane kształty i wymiary, np. określonego zbiornika. Proces odlewania przeprowadza się za pomocą maszyn odlewniczych lub bez ich pomocy, z użyciem narzędzia, którym jest forma odlewnicza mająca gniazdo formujące, lub niekiedy bez narzędzia w ścisłym tego słowa znaczeniu. Z podanych wiadomości wynika, że do odlewania nadają się zarówno tworzywa utwardzalne, jak i termoplastyczne.

Odlewanie było dawniej stosowane głównie do otrzymywania pojedynczych sztuk lub małych serii przedmiotów, którym nie stawiało się specjalnych wymagań technicznych, np. do reprodukcji dzieł sztuki, do modeli dydaktycznych, zabawek. Obecnie odlewanie stosuje się coraz częściej również do otrzymywania przedmiotów o znaczeniu technicznym, którym stawia się duże wymagania użytkowe.

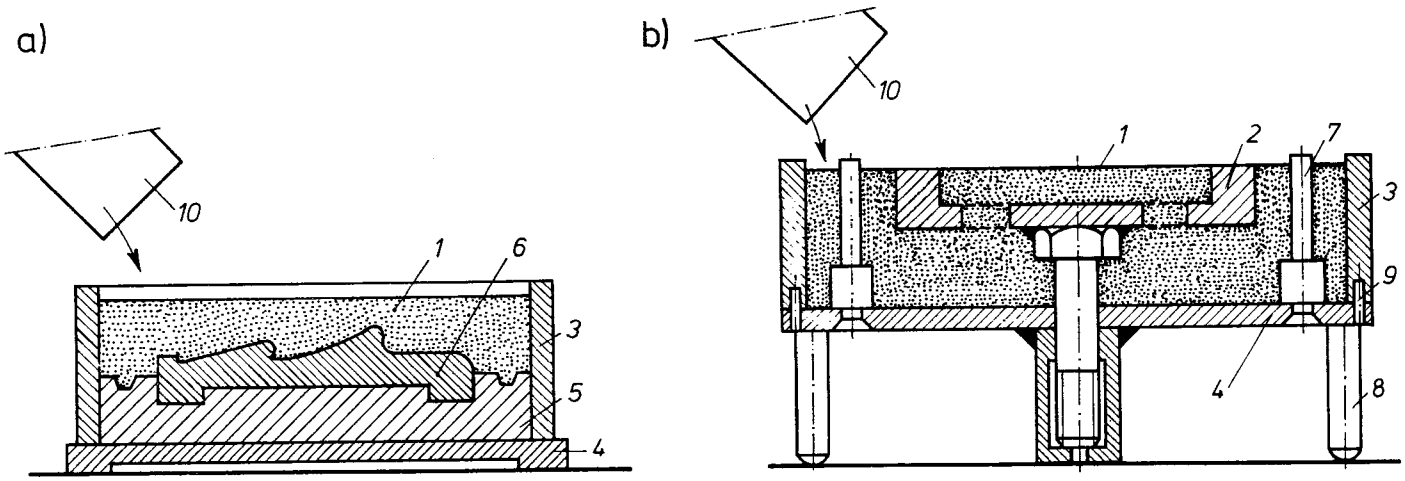
Odlewanie dzieli się na kilka odmian. Ważniejsze z nich są następujące: odlewanie normalne, odlewanie rotacyjne, wylewanie i zalewanie.

3.5.1. Odlewanie normalne

Do odlewania normalnego stosuje się tworzywa utwardzalne będące w stanie ciekłym lub plastycznym. Sporządza się je na ogół bezpośrednio przed procesem odlewania. Sporządzanie tworzywa polega na zmieszaniu, głównie mechanicznym, w odpowiednich proporcjach i kolejności: polimeru, utwardzacza, rozcieńczalnika, napełniacza — przede wszystkim proszkowego, środka barwiącego, przyspieszacza i innych niezbędnych składników dodatkowych, w zależności od rodzaju tworzywa, żądanych właściwości przetwórczych, głównie lejności, oraz właściwości i struktury odlewu po utwardzeniu, jak również polega na odgazowaniu mieszaniny (p. 3.7.2).

Właściwości odlewu, zwłaszcza użytkowe, zależą również w sposób istotny od przebiegu procesu wypełniania gniazda i utwardzania odlewu. Na przebieg ten można oddziaływać głównie poprzez:

— kinematykę wypełnienia gniazda formującego; gniazdo można wypełniać bezpośrednio wlewając do niego tworzywo i wówczas zachodzi odlewanie bezciśnieniowe, a formy są na ogół otwarte (rys. 3.111), lub pośrednio — kanałowo, czyli wlewając tworzywo przez kanał odlewniczy i w takim przypadku zachodzi odlewanie ciśnieniowe, a formy są zamknięte (rys. 3.112),

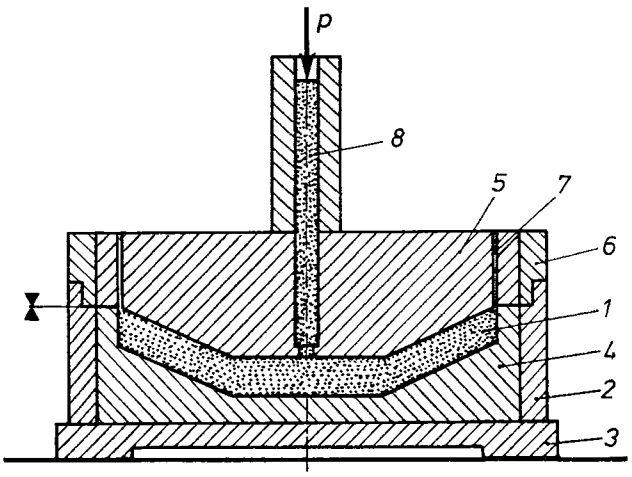


Rys. 3.111. Schemat procesu odlewania bezpośredniego bezciśnieniowego w formie otwartej w przypadku: a) odlewu jednorodnego, b) odlewu z elementem metalowym; *1* — odlew (przedmiot odlewany), *2* — element zalewany, *3* — obudowa formy, *4* — podstawa formy, *5* — matryca, *6* — model, *7* — sworznie kształtujące, *8* — kołki podstawy, *9* — sworznie ustalające, *10* — naczynie z tworzywem sporządzonym do odlewania

— temperaturę formy; forma może mieć temperaturę normalną lub zbliżoną do niej bądź temperaturę podwyższoną — wyższą od temperatury tworzywa wlewanego o 120÷180°C [3.92],

— ochładzanie odlewu; odlew można ochładzać powoli — zazwyczaj razem z formą lub wyjmując odlew z gniazda i umieszczając go w specjalnej komorze, bądź szybko — wyjmując odlew z gniazda i pozostawiając go na wolnym powietrzu.

Odlewanie bezciśnieniowe stosuje się wtedy, gdy jedna strona odlewu w czasie

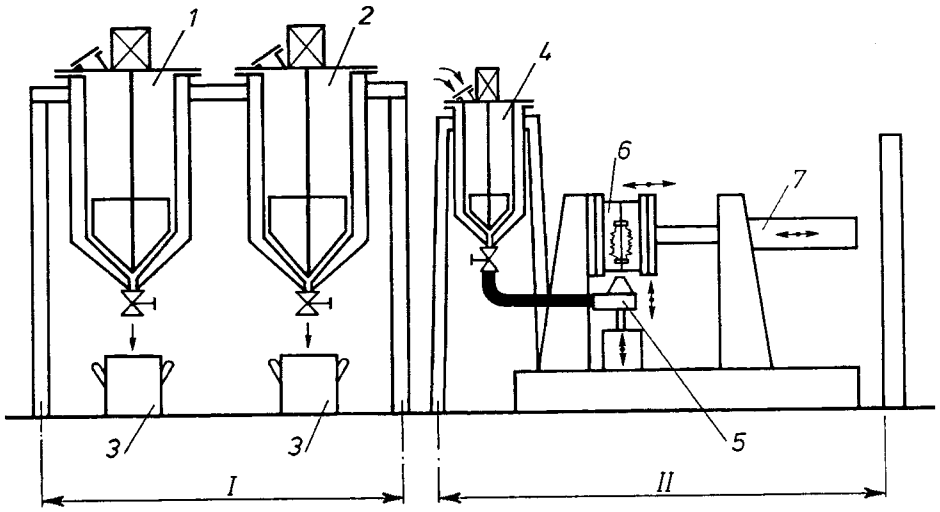


Rys. 3.112. Schemat procesu odlewania pośredniego — kanałowego, ciśnieniowego w formie zamkniętej (dzielonej): *1* — odlew, *2* — obudowa matrycy, *3* — podstawa formy, *4* — matryca, *5* — stempel, *6* — obudowa stempla, *7* — kanały odpowietrzające, *8* — kanał odlewniczy, *9* — ciśnienie wywierane na tworzywo odlewane, np. ciśnienie powietrza

odlewania ma płaszczyzny poziome, jest to mianowicie strona, od której wlewa się tworzywo do gniazda. Odlewanie ciśnieniowe natomiast pozwala na otrzymywanie odlewów o płaszczyznach również niepoziomych podczas odlewania. Często uważa się, że odlewanie ciśnieniowe zapewnia lepsze właściwości odlewu [3.11, 3.186] i istotnie ogranicza emisję do atmosfery ubocznych produktów procesu utwardzania, np. w przypadku odlewania tworzyw poliestrowych [3.41].

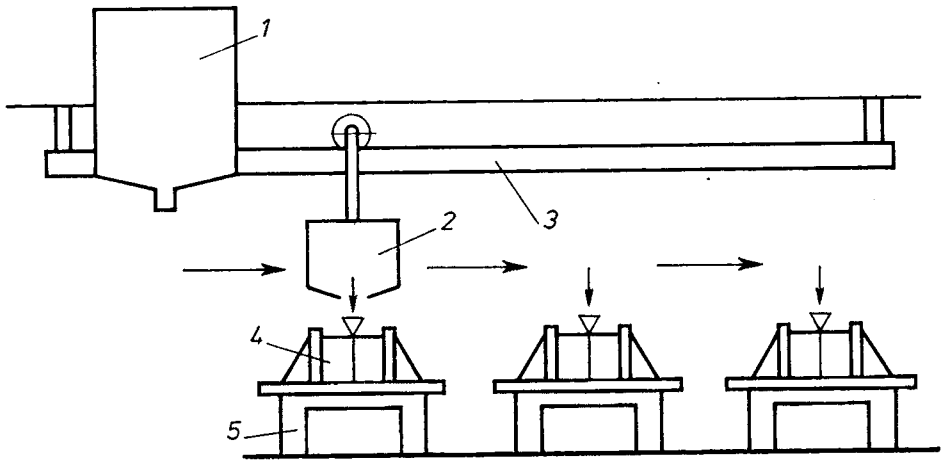
Reakcje utwardzania tworzywa są egzotermiczne. Jeżeli forma nie jest ogrzewana, to po wypełnieniu gniazda proces utwardzania tworzywa jest intensywniejszy tam, gdzie temperatura jest wyższa, czyli we wnętrzu odlewu, i wskutek chłodzenia coraz mniej intensywny w kierunku gniazda. Odlew utwardza się zawsze w warunkach określonej szybkości chłodzenia. Gdy natomiast forma jest ogrzewana, wówczas proces utwardzania jest intensywniejszy w obrębie tworzywa przylegającego do gniazda, gdyż tam występuje temperatura najwyższa, i coraz mniej intensywny w kierunku wnętrza odlewu, gdzie temperatura jest najniższa. Ochładzanie odlewu praktycznie rozpoczyna się z chwilą wyjęcia go z gorącej formy lub chłodzenia razem z formą. Wszystko to wpływa na właściwości i strukturę odlewów — przede wszystkim przy formach ogrzewanych występują mniejsze naprężenia własne w odlewach i związane z nimi odkształcenia odlewów.

Formy do odlewania normalnego są dość często jednogniazdowe. Wykonuje się je z metali, a w przypadku stosowania do odlewania niedużych serii jednakowych odlewów lub pojedynczych sztuk odlewania — z tworzyw wielkocząsteczkowych, drewna, gipsu, a nawet gliny [3.6]. Elementy zalewane w odlewie sytuuje się podobnie jak zapraski w formach wtryskowych i prasowniczych, ale interesujące jest ich ustawienie w gnieździe za pomocą magnesów [3.134]. Odlewanie niedużych serii i pojedynczych sztuk odlewów odbywa się oczywiście bez użycia maszyn odlewniczych. Na rysunku 3.113 przedstawiono przykładowo schemat stanowiska technologicznego do wytwarzania większych serii izolatorów epoksydowych za pomocą



Rys. 3.113. Schemat stanowiska technologicznego odlewania ciśnieniowego większej serii izolatorów epoksydowych; oznaczenia w tekście [3.206]

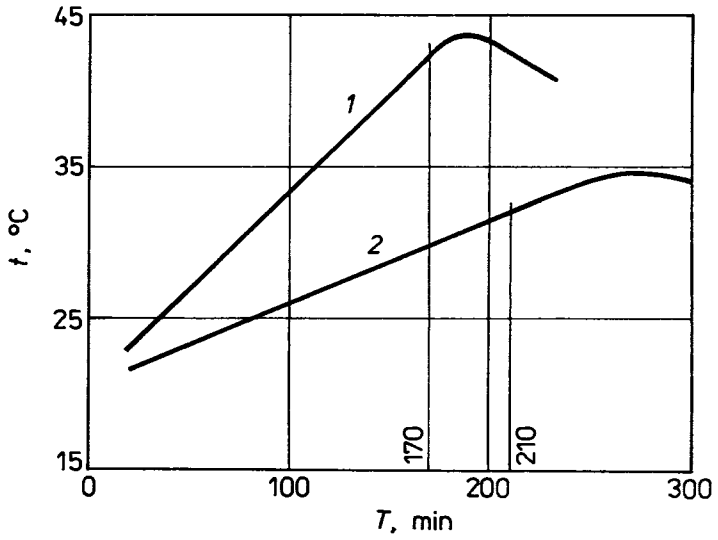
odlewania ciśnieniowego. Składa się ono z dwu podstawowych zespołów: zespołu *I* przygotowania tworzywa do odlewania i zespołu *II* odlewniczego. Zespół *I* tworzą mieszarki próżniowe (*1*) i (*2*) do mieszania wstępnego odpowiednio żywicy epoksydowej E5 z proszkiem kwarcowym i utwardzacza bezwodnikowego BTMG również z proszkiem kwarcowym, z możliwością nagrzewania mieszanin do temperatury 150°C, pojemniki (*3*) na obie mieszaniny oraz mieszarka próżniowo-ciśnieniowa (*4*) do mieszania zasadniczego pod obniżonym ciśnieniem $(3 \div 7) \times 10^2$ Pa mieszanin otrzymanych uprzednio i następnie do podawania tworzywa pod ciśnieniem $0{,}2 \div 0{,}3$ MPa do zespołu *II*. Zespół ten składa się z dozownika (*5*), formy odlewniczej (*6*) i układu zamykająco-otwierającego formy (*7*). Z kolei na rys. 3.114 jest pokazany schemat linii technologicznej odlewania bezciśnieniowego z zastosowaniem trzech jednakowych form odlewniczych.



Rys. 3.114. Schemat linii technologicznej odlewania bezciśnieniowego: *1* — zbiornik lub zbiorniki tworzywa do odlewania, *2* — pojemnik ewentualnie z mieszadłem na tworzywo odlewane, *3* — szyna jezdna, *4* — formy odlewnicze, *5* — stojaki do form

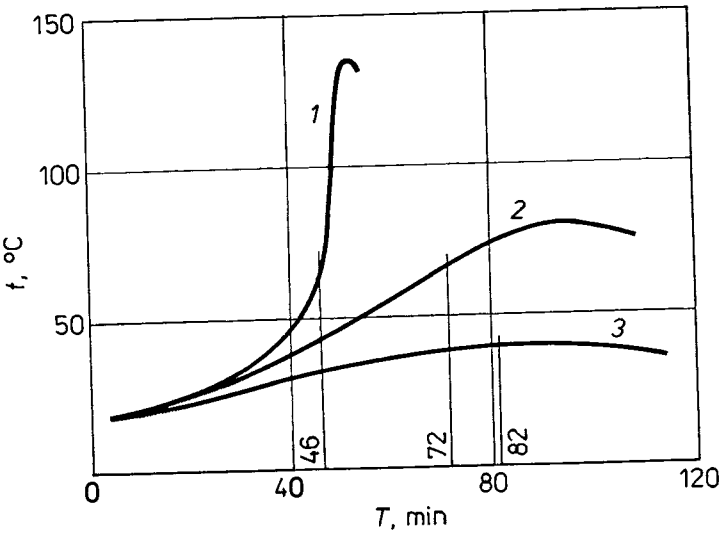
Szczególne znaczenie ma odlewanie normalne tworzyw epoksydowych. Z technologicznego punktu widzenia ważna jest znajomość zależności między czasem trwania

nie utwardzonego tworzywa — czasem liczonym od chwili połączenia żywicy i utwardzacza, w którym nie utwardzone tworzywo epoksydowe nadaje się do odlewania, a temperaturą otoczenia, wzajemnymi proporcjami żywicy i utwardzacza, ilością i właściwościami napełniacza proszkowego oraz ilością sporządzonego tworzywa epoksydowego [3.23, 3.157]. Ze wzrostem temperatury otoczenia wzrasta reaktywność nie utwardzonego tworzywa — przy założeniu, że temperatura żywicy i utwardzacza jest w chwili zmieszania równa temperaturze otoczenia. Czas trwania można przedłużyć przechowując mieszaninę w niższej temperaturze, nawet poniżej 0°C. Wzajemne proporcje żywicy i utwardzacza znacznie wpływają na czas trwania. Dodanie utwardzacza w ilości większej niż stechiometryczna zwiększa reaktywność i powoduje krótszy czas trwania oraz powiększa ilość tworzywa, co, jak wykazano dalej, również zwiększa reaktywność i odwrotnie. Pierwszy czynnik dominuje przy mieszaninach z małą ilością utwardzacza, np. w przypadku trietylenotetraaminy, natomiast w mieszaninach z dużą ilością utwardzacza, np. poliaminoamidu, dominuje czynnik drugi, co pokazano przykładowo na rys. 3.115. Wpływ ilości i właściwości

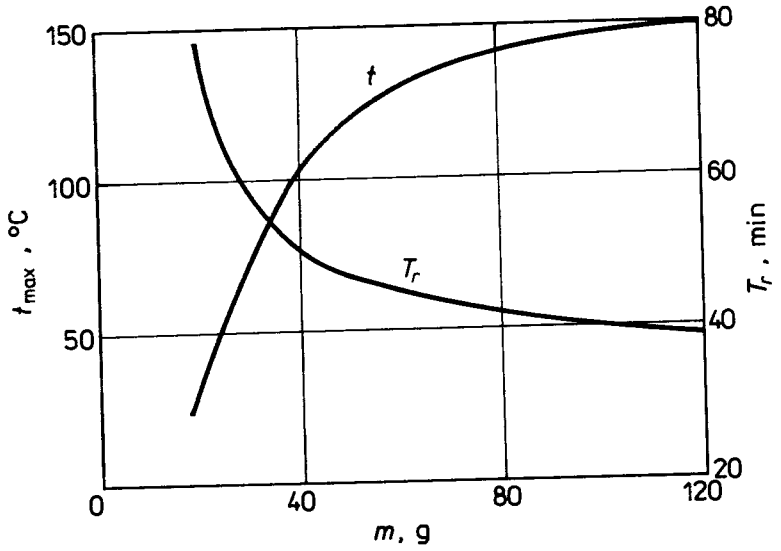


Rys. 3.115. Zależność temperatury t tworzywa od czasu T utwardzania: *1* — E5/PAC/60:84, *2* — E5/PAC/60:60; czas trwania tworzywa wynosi odpowiednio 170 i 210 min

napełniacza na czas trwania tworzywa jest również znaczny. Napełniacze zmniejszają ilość ciepła wydzielanego z jednostki objętości tworzywa i powiększają ilość ciepła odprowadzanego do otoczenia, przy czym to ostatnie wyraźnie zależy od ilości i właściwości napełniacza, np. wprowadzenie proszku glinki kaolinowej powoduje mniejsze odprowadzanie ciepła, a wprowadzenie proszku aluminium — większe (rys. 3.116). Nie utwardzone tworzywa epoksydowe w większych ilościach odznaczają się maksymalną temperaturą procesu utwardzania nie niższą niż tworzywa w mniejszych ilościach o tym samym składzie, temperaturze otoczenia i innych tych samych warunkach, co pociąga za sobą nie dłuższy czas trwania (rys. 3.117). Jest to spowodowane mniejszą ilością ciepła odprowadzanego z wnętrza tworzywa, wskutek złego przewodzenia ciepła. W związku z tym wzrasta temperatura mieszaniny, co zwiększa jej reaktywność, a w konsekwencji powoduje krótszy czas trwania.



Rys. 3.116. Zależność temperatury t tworzywa od czasu T utwardzania: *1* — E5/Z-1/10:1, *2* — E5/Z-1/G/10:1, *3* — E5/Z-1/A/10:1; czas trwania tworzywa wynosi odpowiednio 46, 72 i 82 min

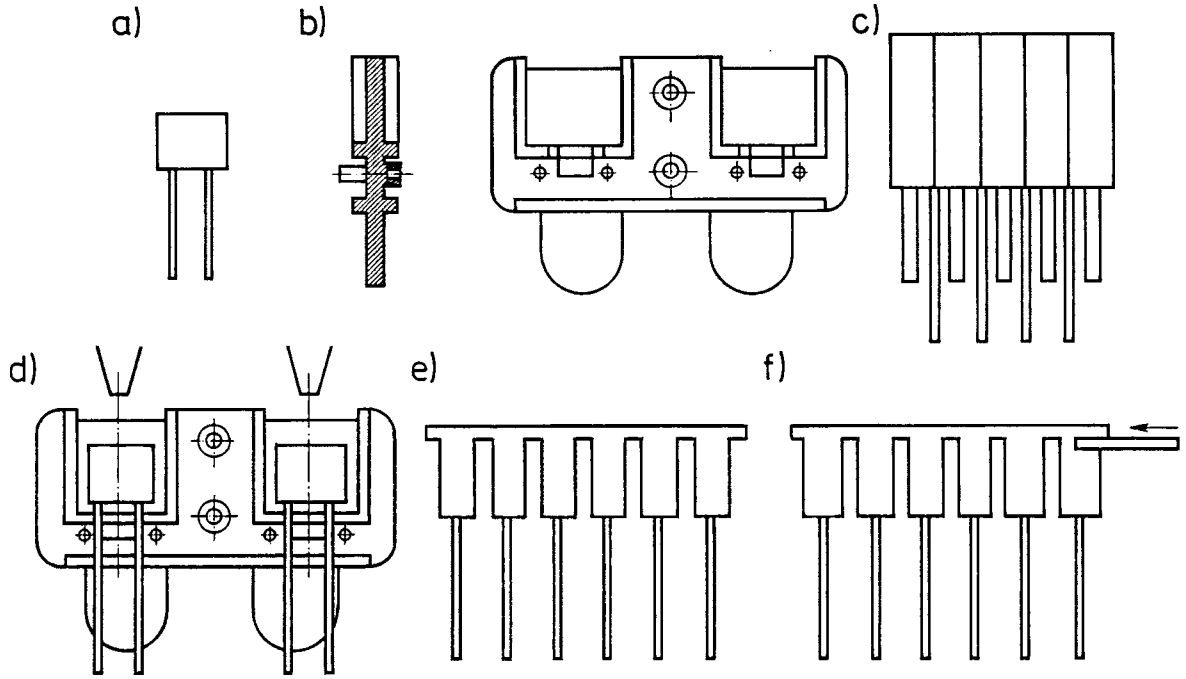


Rys. 3.117. Zależność maksymalnej temperatury t_{max} i czasu T_r trwania tworzywa E5/Z-1/10:1 od ilości m żywicy epoksydowej

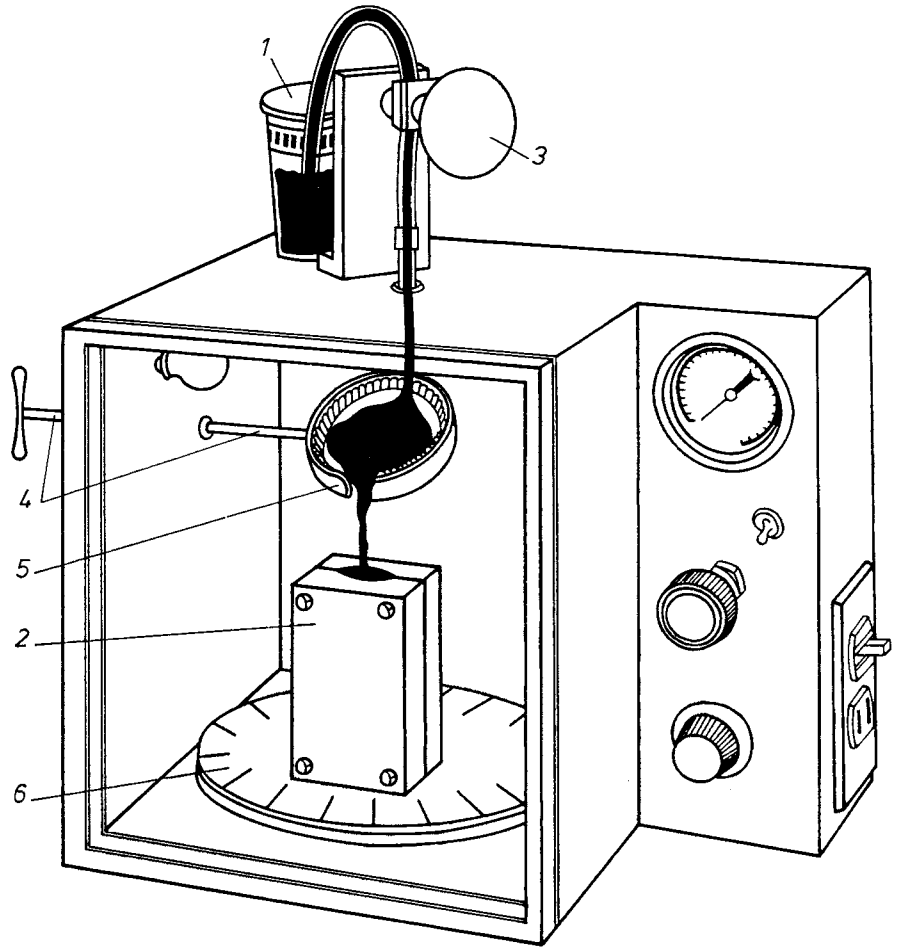
Trzeba jeszcze wspomnieć o *odlewaniu radiacyjnym*, w którym utwardzanie tworzywa w formie zachodzi pod wpływem działania promieniowania, przede wszystkim jonizującego oraz nadfioletowego. Odlewy utwardzane w ten sposób wykazują wiele zalet. Dotychczas stosuje się je najczęściej do tworzyw poliestrowych.

Odlewanie normalne stosuje się efektywnie od dawna do wytwarzania, w określonych przypadkach, oprzyrządowania technologicznego, zwłaszcza odlewniczego i stosowanego w obróbce skrawaniem, oraz do wytwarzania narzędzi, zwłaszcza wykrojników i narzędzi do obróbki skrawaniem [3.5, 3.6, 3.11, 3.14, 3.113, 3.204].

Elementami zalewanymi mogą być elementy elektroniczne i wówczas odlewanie takie w przemyśle elektronicznym nazywa się często *hermetyzacją odlewniczą* (por. hermatyzację przetłoczną — p. 3.3.2). Hermetyzacja ta odbywa się w na ogół prostych formach w kształcie prostopadłościanu lub walca, wykonanych z metali bądź tworzyw wielkocząsteczkowych. W formach umieszcza się elementy elektryczne i zalewa



Rys. 3.118. Schemat procesu hermetyzacji odlewniczej elementów elektronicznych w formie wielogniazdowej segmentowej: a) element przed hermetyzacją, b) segment formy z PP, c) forma złożona z segmentów z wprowadzonymi elementami, d) wlewanie mieszaniny, e) odlew z zalanymi elementami, f) rozdzielanie odlewu na poszczególne części [3.149]



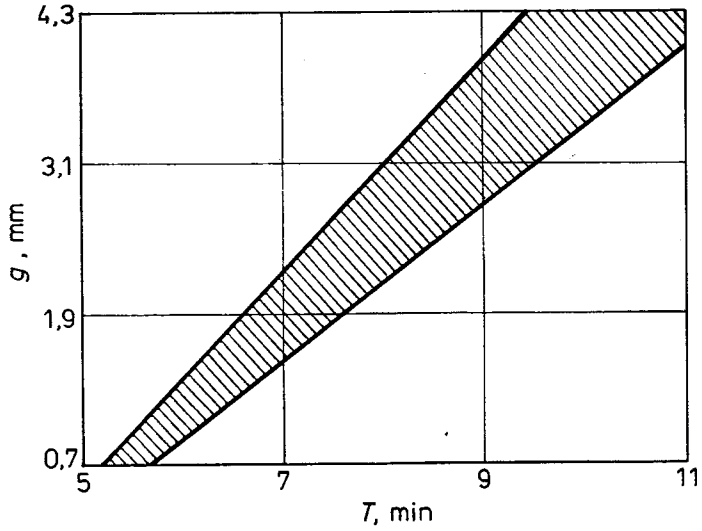
Rys. 3.119. Urządzenie do hermetyzacji odlewniczej pod obniżonym ciśnieniem: *1* — pojemnik z tworzywem do odlewania, *2* — forma odlewnicza, *3* — zawór, 4 — ramię do manipulowania dozownikiem, *5* — dozownik, *6* — stół obrotowy z podziałką [3.149]

sporządzoną mieszaniną. Po utwardzeniu elementy otoczone tworzywem wyjmuje się z formy. Na rysunku 3.118 przedstawiono schematycznie proces hermetyzacji odlewniczej elementów elektronicznych w formie wielogniazdowej złożonej z segmentów. W niektórych przypadkach tworzywo otaczające elementy elektroniczne nie może zawierać nawet nielicznych i małych pęcherzyków powietrza i wówczas trzeba je odlewać pod ciśnieniem, tak jak np. pokazano to na rys. 3.119, lub za pomocą urządzeń bardziej złożonych, często w dużym stopniu zautomatyzowanych i zrobotyzowanych.

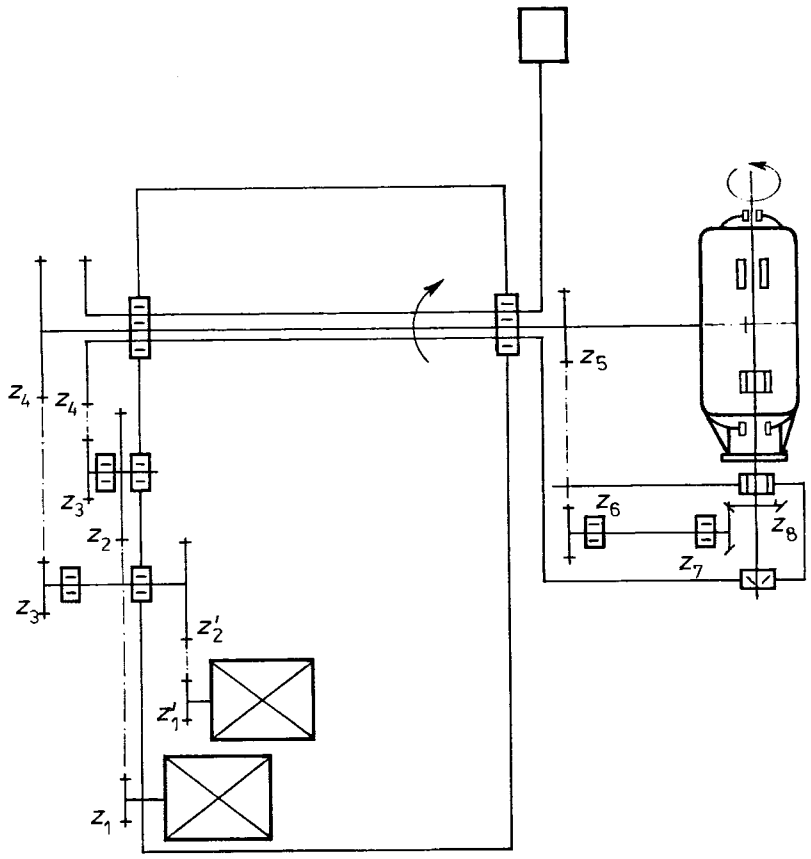
3.5.2. Odlewanie rotacyjne

Jeżeli w procesie odlewania wykorzystuje się siłę odśrodową działającą na tworzywo odlewane, to proces taki nosi nazwę odlewania rotacyjnego (obrotowego lub odśrodkowego). W odlewaniu tym forma wewnętrzna dzielona, definiowana jak w punkcie 3.4, lecz z gniazdem zamkniętym, mająca gniazdo o kształcie i wymiarach odpowiadających kształtowi i wymiarom zewnętrznym odlewu, wykonuje ruch obrotowy, złożony (planetarny) lub prosty (kołowy), natomiast tworzywo w stanie ciekłym jest siłą odśrodkową kierowane na ścianki gniazda i równomiernie na niej rozprowadzane. Zestalanie lub utwardzanie tworzywa odbywa się w obracającej się formie, po czym formę zatrzymuje się, otwiera i z gniazda wyjmuje odlew (np. zbiornik lub rurę) — formę niejako zdejmuje się z odlewu.

Szczególnie duże znaczenie ma *odlewanie rotacyjne planetarne* tworzyw termoplastycznych (głównie PE, PVC, PA, PS, PC i ABS) w celu otrzymania zbiornika. Na ogół tworzywo wejściowe ma postać proszku o rozmiarach ziarn $50 \div 200$ μm, który w odpowiedniej ilości wsypuje się do gniazda formy. Następnie formę wprawia się w powolny ruch obrotowy planetarny i ogrzewa. W tym czasie tworzywo osadza się na powierzchni gniazda, uprzednio pokrytej środkiem przeciwprzyczepnym, i stapia. Prędkości obu obrotów zależą przede wszystkim od rozmiarów formy i wynoszą przeciętnie $0{,}3 \div 0{,}8\ s^{-1}$ (mniejsza prędkość dla większej formy i odwrotnie). Ogrzewanie i chłodzenie formy może odbywać się poprzez przemieszczanie obracającej się formy z komory grzejnej do komory chłodzącej, w jednej komorze na przemian ogrzewanej i chłodzonej lub bezkomorowo za pomocą form w ściankach podwójnych do wprowadzania czynnika ogrzewającego lub chłodzącego — gazowego bądź ciekłego. Grubość ścianki zbiornika z danego tworzywa zależy przede wszystkim od czasu trwania procesu odlewania rotacyjnego i temperatury (rys. 3.120). Skurcz przetwórczy tworzywa jest większy niż skurcz cieplny materiału gniazda i skierowany do wewnątrz, co ułatwia wyjmowanie odlewu z gniazda. Formy powinny mieć małą masę, dlatego wykonuje się je głównie z blach ze stopów aluminium i rzadziej z blach stalowych [3.84, 3.200]. Na rysunku 3.121 przedstawiono schemat kinematyczny jednego z rozwiązań odlewniczej maszyny rotacyjnej, a na rys. 3.122 schemat stanowiska technologicznego rotacyjnego z użyciem formy o podwójnych ściankach. W celu zwiększenia wydajności stosuje się stanowiska wieloformowe, np. wydajność stanowiska czteroformowego wynosi 500 dużych zbiorników na godzinę [3.55]. Za pomocą odlewania rotacyjnego planetarnego otrzymuje się zazwyczaj zbiorniki



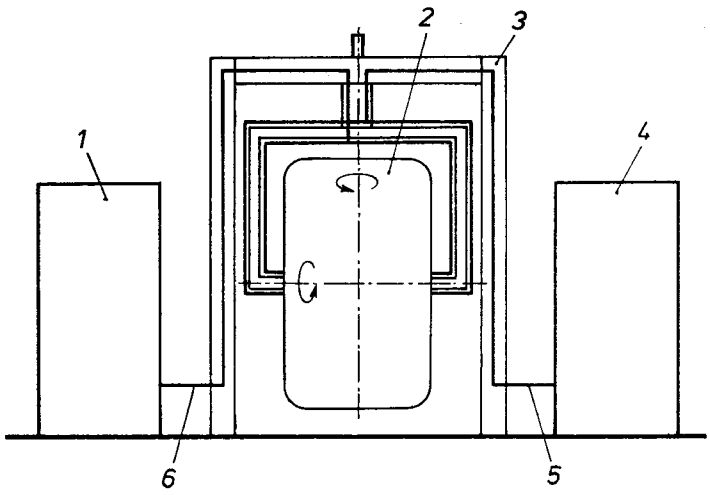
Rys. 3.120. Zależność grubości g ścianki zbiornika z PE-LD od czasu T nagrzewania w procesie odlewania rotacyjnego; ogrzewanie formy prowadzono w komorze z gorącym powietrzem [3.202]



Rys. 3.121. Schemat kinematyczny odlewniczej maszyny rotacyjnej o nazwie 300 (OBR Metalchem w Toruniu)

o pojemności $0{,}5 \div 10$ m^3, ale mogą być również większe, np. jak podaje firma Caccia (Włochy) o pojemności 45 m^3. Ścianki zbiorników odznaczają się równomierną grubością, są niemal bez naprężeń własnych i pęcherzy powietrza, lecz z mało gładką powierzchnią wewnętrzną.

Odlewanie rotacyjne kołowe stosuje się do otrzymywania rur lub elementów obrotowych z tworzyw utwardzalnych bądź termoplastycznych. W przypadku odlewania rur z tworzyw utwardzalnych wzmacnianych włóknem, do gniazda formy



Rys. 3.122. Schemat stanowiska technologicznego odlewania rotacyjnego z użyciem formy o podwójnych ściankach: *1* — układ ogrzewania, *2* — forma z podwójnymi ściankami, *3* — korpus mocujący formę, *4* — układ chłodzenia, *5* — przewody cieczy chłodzącej, *6* — przewody cieczy ogrzewającej (na rysunku nie zaznaczono układu napędowego i układów sterowania oraz regulacji automatycznej)

rurowej, mocowanej w odlewniczej maszynie rotacyjnej, wprowadza się włókna (najczęściej krótkie włókna szklane), spoiwo ciekłe oraz ewentualnie napełniacze proszkowe i formę wprawia się w ruch obrotowy z prędkością nawet do 42 s^{-1} przy małych średnicach rur. Laminat zazwyczaj utwardza się w podwyższonej temperaturze poprzez ogrzewanie go z zewnątrz formy lub ogrzewanie gorącym powietrzem wprowadzanym do wnętrza formy. Po utwardzeniu formę zatrzymuje się, nieco ochładza i bez trudu wyjmuje rurę z gniazda. Zawartość szkła w laminacie wynosi 25÷45%, średnica rur dochodzi na ogół do 3000 mm, grubość ścianek do 40 mm. Można również wytwarzać rury przekładkowe: tam, gdzie występują naprężenia największe w czasie użytkowania rur, znajduje się laminat (zazwyczaj w warstwach zewnętrznych ścianki), natomiast tam, gdzie występują naprężenia najmniejsze, stosuje się tworzywo napełnione dużą ilością taniego napełniacza proszkowego, głównie piasku kwarcowego (wnętrze ścianki). W ten sposób wytwarza się rury do instalacji sanitarnych w firmie Högenäs (Szwecja) i Armaver (Szwajcaria).

Elementami obrotowymi wytwarzanymi poprzez odlewanie rotacyjne kołowe są np. tuleje łożyskowe z tworzyw poliamidowych [3.130]. W gnieździe formy najpierw stapia się i rozprowadza poliamid, a potem wtryskuje podgrzany środek smarujący — dwusiarczek molibdenu, dwusiarczek wolframu, grafit.

3.5.3. Wylewanie i zalewanie

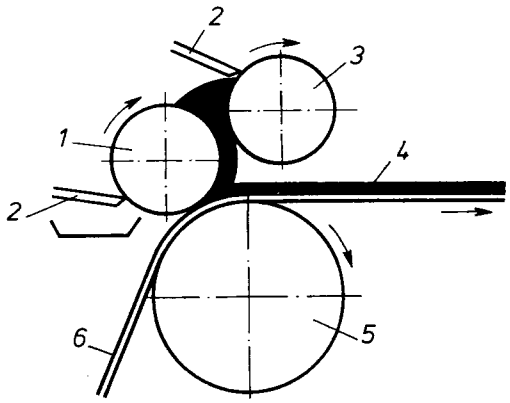
Wylewanie oraz zalewanie są odmianami odlewania prowadzonymi w warunkach dość specyficznych i są znacznie mniej rozpowszechnione od odmian odlewania dotychczas przedstawionych.

Wylewanie

Wylewanie jest jedną z technik otrzymywania folii i polega na wypływie ze stałym natężeniem tworzywa w stanie plastycznym lub rzadziej ciekłym na przesuwające się

podłoże. Odbywa się ono za pomocą maszyn do wylewania, których zasadniczą częścią składową jest narzędzie do wylewania. Najistotniejszym elementem narzędzia do wylewania jest szczelina o określonym kształcie i rozmiarach, z której wypływa tworzywo. Szczelina może być międzywalcowa i wówczas narzędziem jest układ na ogół trzech bądź czterech walców lub może być międzypłaszczyznowa i w takim przypadku narzędziem jest głowica wylewająca.

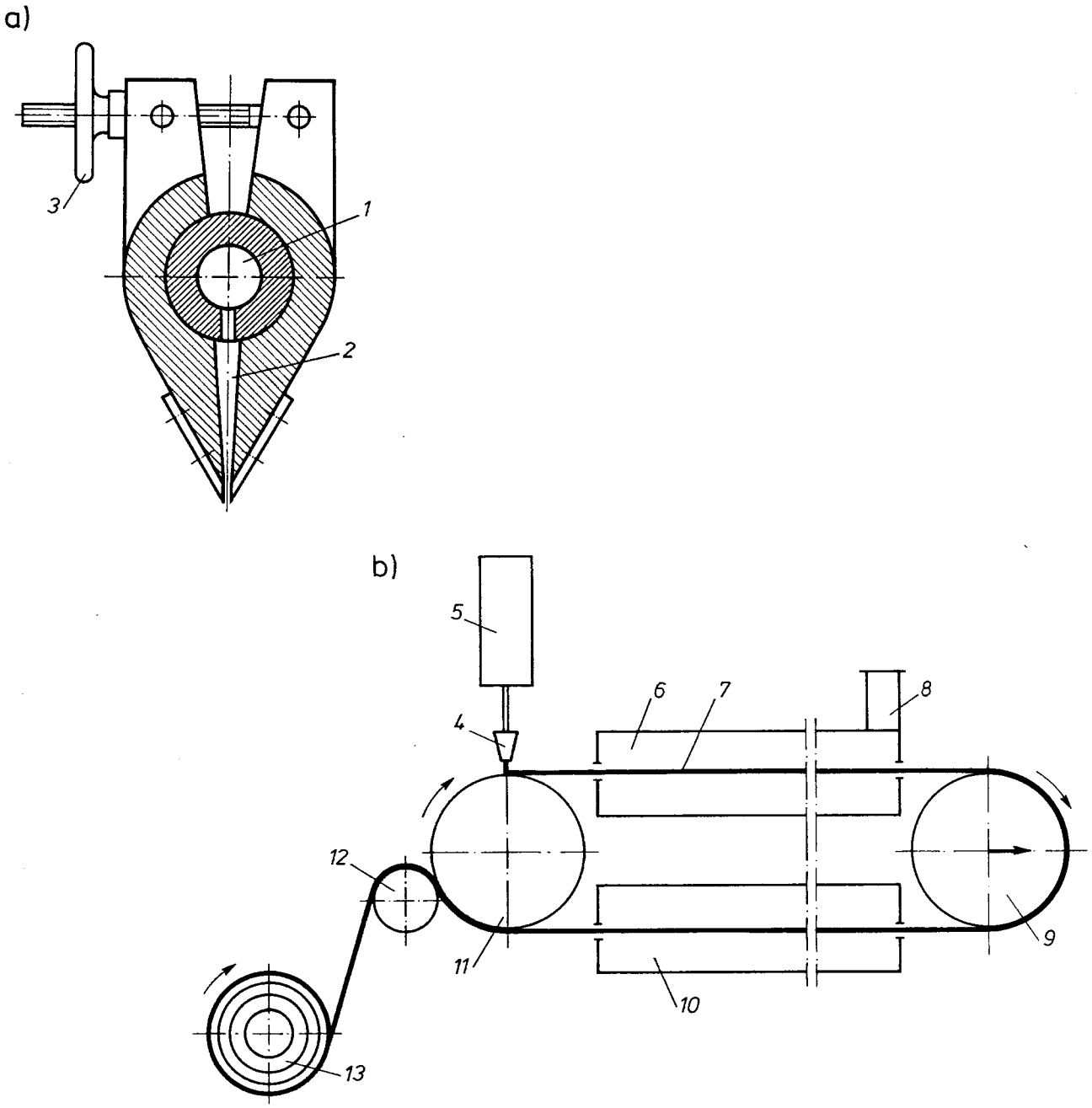
Schemat procesu wylewania folii za pomocą układu trzech walców pokazano na rys. 3.123. Wszystkie walce wykonują obroty w tym samym kierunku. Układ ten stosuje się głównie do wylewania cienkich folii ze zmiękczonego PVC (np. o grubości 80 μm). Pastę — plastizol PVC wylewa się na przesuwającą się taśmę stalową, tworzywową lub papierową w temperaturze pokojowej i przeprowadza przez tunel grzejny, gdzie następuje żelowanie pasty. Gdy taśma jest stalowa, wówczas temperatura w tunelu wynosi 180÷190°C. Pokrywa się ją środkiem przeciwprzyczepnym oraz przesuwa z prędkością 1,5 m/s i większą. Następnie folię ochładza się, zdejmuje z taśmy i zwija na wale odbierającym. Na rysunku 3.124 przedstawiono głowicę wylewającą i stanowisko technologiczne wylewania folii z użyciem głowicy. Sposób działania stanowiska wynika z rysunku.



Rys. 3.123. Schemat procesu wylewania folii za pomocą układu trzech walców: *1* — walec powlekający przeciwbieżny, *2* — listwy zgarniające, *3* — walec dozujący, *4* — warstwa tworzywa stanowiąca późniejszą folię, *5* — walec dociskający i prowadzący podłoże (taśmę), *6* — podłoże (taśma)

Zalewanie

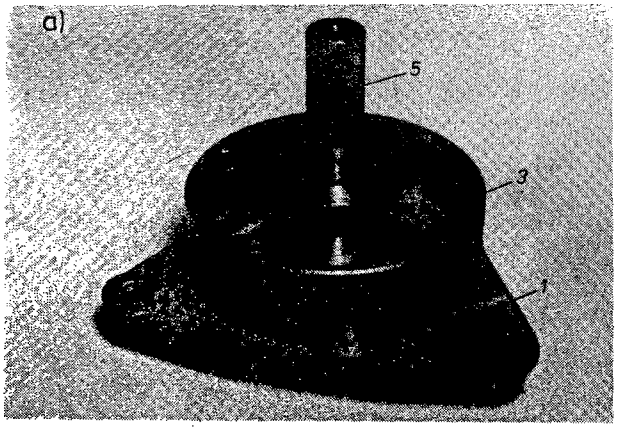
Zalewanie jest odmianą odlewania stosowaną przede wszystkim w procesie regeneracji elementów maszyn, do uzupełniania ubytków materiału w gniazdach, gdzie osadza się łożyska toczne. Do zalewania potrzebne są specjalne przyrządy, zapewniające zachowanie współosiowości zalanego tworzywa z osią geometryczną gniazda oraz mające właściwą średnicę trzpienia pozwalającą na otrzymanie w danych warunkach gniazd o średnicy odpowiedniej do przyjętego pasowania z łożyskiem. Proces zalewania rozpoczyna się od wybrania materiału gniazda, zwykle za pomocą obróbki skrawaniem, np. toczenia zgrubnego, prowadzącego do powiększenia średnicy gniazda. Następnie po zmontowaniu przedmiotu, względem którego ma się przeprowadzić proces zalewania, z przyrządem, w szczelinę między obrobioną powierzchnią gniazda (chropowatą) a powierzchnią trzpienia (gładką) pokrytą środkiem przeciwprzyczepnym wprowadza się ciekłe tworzywo. Zalewanie szczeliny

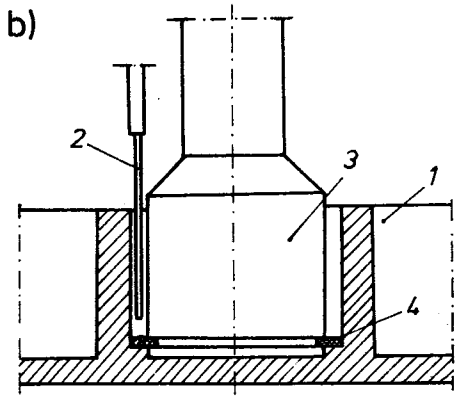


Rys. 3.124. Głowica wylewająca (a) oraz stanowisko technologiczne wylewania folii (b): *1* — główny kanał rozdzielający, *2* — dysza międzypłaszczyznowa, *3* — pokrętło regulacyjne, *4* — głowica, *5* — zbiornik tworzywa do wylewania, *6* — tunel grzejny, *7* — taśma z wylaną warstwą tworzywa, *8* — wyciąg, *9* — walec napinający i napędzający taśmę, *10* — tunel chłodzący, *11* — walec prowadzący taśmę, *12* — walec zdejmujący folię, *13* — zwój folii

odbywa się za pomocą dużej strzykawki szklanej lub z tworzyw w ten sposób, że koniec igły strzykawki umieszcza się na dnie szczeliny i następnie w ruchu śrubowym ku górze wprowadza się tworzywo w szczelinę (rys. 3.125). Po zestaleniu lub utwardzeniu tworzywa następuje demontaż przyrządu i przedmiotu.

Do zalewania najczęściej stosuje się tworzywa epoksydowe, co jest spowodowane głównie ich małym skurczem przetwórczym. Do najważniejszych czynników w procesie zalewania należą relacje wymiarów w układzie: średnica zewnętrzna łożyska–średnica gniazda po obróbce–średnica trzpienia–średnica tolerowana gniazda po zalewaniu. Relacje te zależą w zasadniczy sposób od rodzaju tworzywa zale-





Rys. 3.125. Wygląd zmontowanego zestawu: przedmiot, względem którego ma się przeprowadzić zalewanie–przyrząd do zalewania (a) oraz schemat procesu zalewania (b): *1* — przedmiot (pokrywa prądnicy 120 W, 12 V), *2* — igła strzykawki, *3* — trzpień przyrządu, *4* — uszczelka, *5* — uchwyt przyrządu

wanego, rodzaju materiału przedmiotu oraz trzpienia, jak również od temperatury utwardzania. Przykładowe, dobrane doświadczalnie relacje zamieszczono w tabl. 3.10.

Tablica 3.10

Wymiary charakterystyczne występujące w procesie zalewania, jak na rys. 3.125, z użyciem tworzywa epoksydowego E5/PAC/A/1:1

Element	Wymiar, mm	Odchyłki wymiaru, μm	
		górna	dolna
Łożysko — wymiar zewnętrzny	Ø40h5	0,0	−0,011
Gniazdo — średnica po obróbce	Ø43	+0,4	0,0
Trzpień — średnica zewnętrzna	Ø40d8	−0,08	−0,119
Gniazdo — średnica po zakończonym procesie zalewania	Ø40K6	+0,003	−0,013

Uwaga: Materiał przedmiotu — stop aluminium AK9, materiał trzpienia — stal St3, warunki utwardzania — 2 h w temperaturze 60°C i następnie 24 h w temperaturze pokojowej, wszystkie wymiary odniesione do temperatury pokojowej.

3.6. Kalandrowanie

Proces kalandrowania polega na ciągłym przepuszczaniu wstępnie uplastycznionego tworzywa, zwanego *plastyfikatem**, jednokrotnie pomiędzy obracającymi się walcami ułożonymi poziomo. Kalandrować można więc tylko tworzywa termoplastyczne. Proces kalandrowania przebiega w kalandrach, gdzie narzędziem są walce kalandrujące. Kalandrowanie jest znane od zarania tworzyw, gdyż jego początek przypada na 1836 r., w którym E.M. Chaffee uzyskał patent amerykański nr 16 na kalander czterowalcowy [3.100]. Kalandry są maszynami przetwórczymi o znacznych rozmiarach i dużej wydajności, dlatego liczba zainstalowanych kalandrów jest stosunkowo mała. W wyniku kalandrowania otrzymuje się materiał wyjściowy w kształcie wstęg o grubości zazwyczaj od 0,08 do 1 mm i szerokości przekraczającej nawet 2 m, zwany powszechnie *folią*, który po odpowiednich zabiegach, niekiedy daleko idących, zwija się na wale odbierającym linii technologicznej kalandrowania.

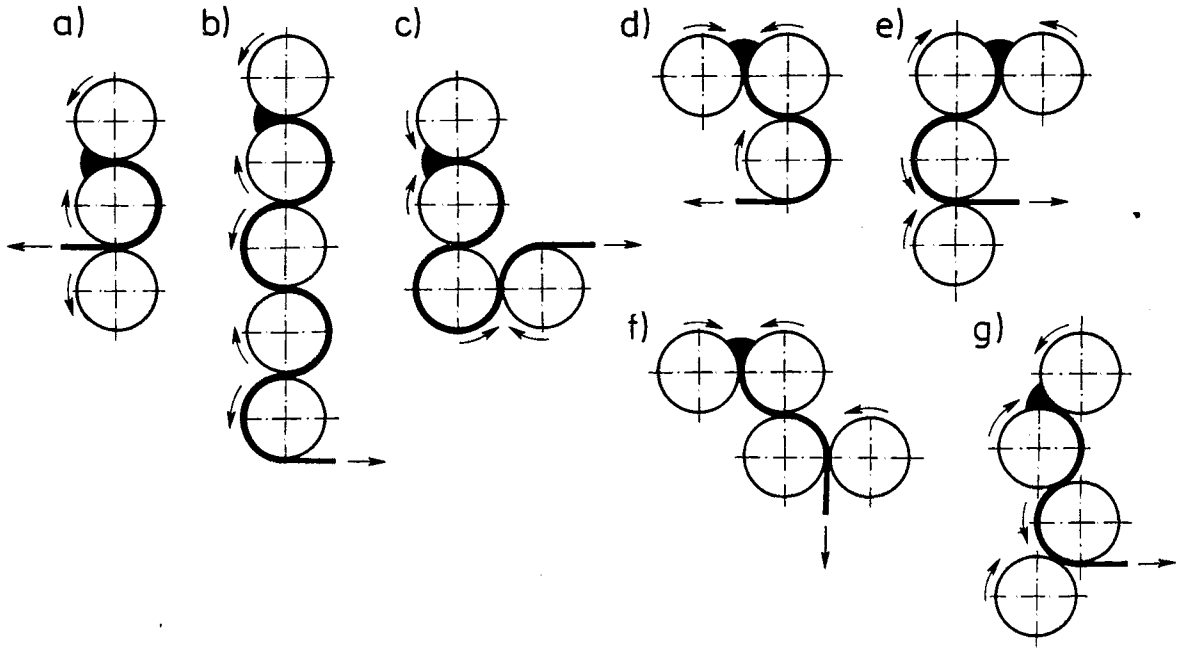
3.6.1. Charakterystyka ogólna

Kalandrowanie stosuje się do wytwarzania folii przede wszystkim z PVC, zarówno twardego jak i zmiękczonego, jest to bowiem tworzywo o dobrej kalandrowalności, a jego właściwości zapewniają na ogół zadowalające cechy użytkowe folii. Poza tym stosuje się je do folii z kauczuków i mieszanek gumowych, kopolimerów chlorku winylu, PVDC, PIB, ABS.

Kalander ma na ogół od trzech do pięciu walców różnie rozmieszczonych. Najczęściej spotyka się układy walców w kształcie liter I, L, L odwrócone, F, Z oraz S (rys. 3.126). Korzystne są układy walców Z i S, gdyż zapewniają one dość prostą regulację rozstawienia walców i co jest z tym związane — grubości folii oraz małą powierzchnię stykania się walców, będących w odpowiedniej temperaturze, z tworzywem, co ma szczególnie duże znaczenie przy kalandrowaniu PVC, łatwo ulegającego degradacji cieplnej. Są jeszcze inne cechy specyficzne układów walców kalandrujących [3.111, 3.115]. Kalandry o trzech walcach w układzie pionowym lub w układzie kątowym służą z reguły do wytwarzania folii grubszych, natomiast inne kalandry do wytwarzania folii o średniej i małej grubości.

Prędkość obwodowa (liniowa) walców wynosi na ogół $0{,}3 \div 2$ m/s. Zależy ona głównie od odkształcalności tworzyw kalandrowanych — jest mniejsza dla tworzyw łatwo odkształcalnych z dużym udziałem odkształceń sprężystych, np. kauczuku, jest również mniejsza przy folii o większej grubości. W większości przypadków, dla danego tworzywa i określonej grubości folii, jest ona coraz większa w kierunku osi od wejścia plastyfikatu do kalandra do wyjścia z niego folii, z wyjątkiem pary walców ostatnich, które odznaczają się jednakową prędkością obwodową. Stosunek prędkości obwodowych lub obrotowych, przy jednakowych średnicach pary walców współ-

* Nazwa ta budzi kontrowersje; ma częściowe uzasadnienie w przypadkach, gdy uplastycznienie tworzywa jest również powodowane wprowadzeniem plastyfikatorów, jak przy kalandrowaniu PVC zmiękczonego, a w innych przypadkach ma charakter tradycyjnej nazwy umownej.



Rys. 3.126. Niektóre układy walców kalandrujących: a) układ trójwalcowy I, b) układ pięciowalcowy I, c) układ L, d) układ odwrócone L, e) układ F, f) układ Z, g) układ S

pracujących (następnego do poprzedniego), nazywa się *frykcją*. Wartość frykcji zazwyczaj nie jest duża i wynosi 1,03÷1,15, ale w niektórych przypadkach kalandrowania kauczuków i mieszanek gumowych może wynosić nawet 1,5 i więcej [3.65]. Odległość kolejnych walców od siebie zmniejsza się stopniowo, np. w układzie L odwrócone, podczas kalandrowania folii z PVC zmiękczonego, najmniejsza odległość wynosi odpowiednio 0,1, 0,07 i 0,04 mm [3.87]. Najmniejsze odległości tworzą minimalną szerokość szczeliny międzywalcowej — ostatnia z nich bezpośrednio determinuje grubość folii danego tworzywa opuszczającej kalander w określonych warunkach. Brak frykcji walców ostatnich powoduje wyrównanie prędkości przepływu w szczelinie międzywalcowej i wygładzanie powierzchni folii. Poszczególne walce mają różną temperaturę; różnica temperatury dwóch współpracujących walców wynosi kilka kelwinów. Najwyższą temperaturę mają walce ostatnie, a tworzywo znajdujące się pomiędzy nimi odznacza się najmniejszą lepkością. Wszystko to powoduje, że po czynnej stronie szczeliny tworzy się nadmiar tworzywa, przyjmującego kształt obracającej się rolki, co powoduje mieszanie i ujednorodnianie tworzywa kalandrowanego.

Zjawiska zachodzące w szczelinach międzywalcowych, mające zasadnicze znaczenie w procesie kalandrowania, są od dawna przedmiotem dużego zainteresowania; najpierw przy licznych założeniach upraszczających [3.98, 3.99, 3.144], później w warunkach coraz bardziej odpowiadających warunkom rzeczywistym [3.9, 3.67, 3.136, 3.137, 3.198].

Na rysunku 3.127 przedstawiono szczelinę międzywalcową w czasie kalandrowania z frykcją. Przyjmując oznaczenia jak na rysunku, frykcję określić można zależnością

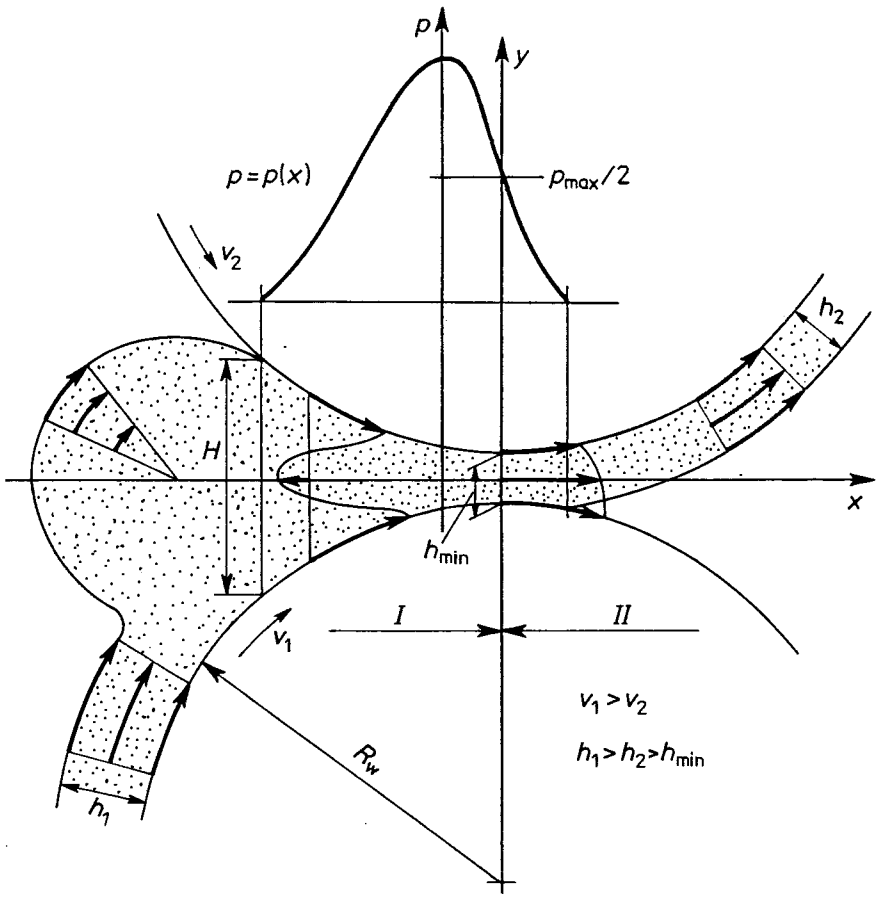
$$\mathrm{fr} = \frac{V_1}{V_2} \tag{3.93}$$

a gradient prędkości ruchu folii względem minimalnej szerokości szczeliny $h_{\min}$

$$\text{grad } V_{fo} = \frac{V_1 - V_2}{h_{min}} \tag{3.94}$$

lub po wykorzystaniu zależności (3.93)

$$\text{grad } V_{fo} = \frac{V_2}{h_{min}} (\text{fr} - 1) \tag{3.95}$$

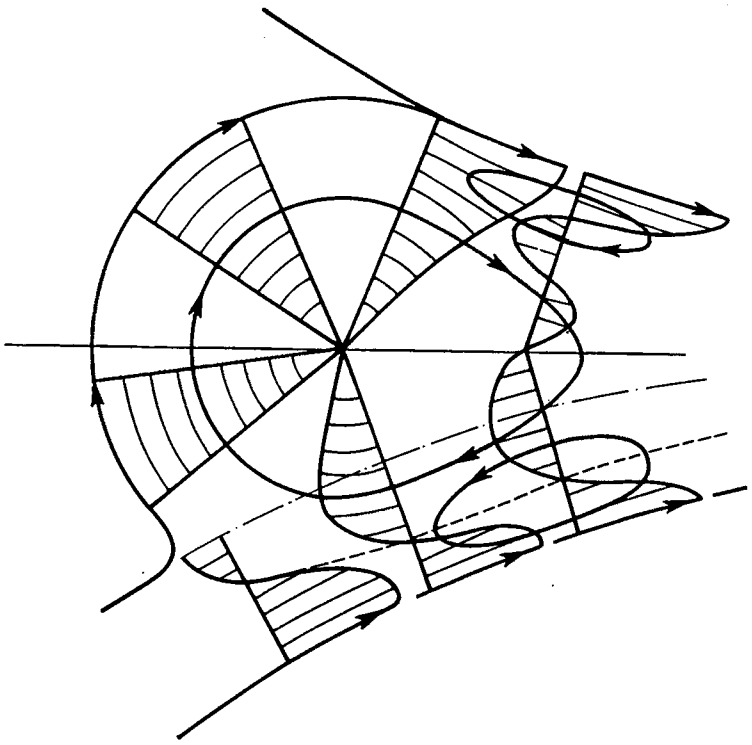


Rys. 3.127. Szczelina międzywalcowa podczas kalandrowania z frykcją; oznaczenia w tekście (dla lepszej przejrzystości szczelina jest nieproporcjonalnie duża w stosunku do średnicy walców)

Podczas wprowadzania tworzywa w szczelinę, warstewki stykające się z powierzchnią walców są zabierane siłami adhezji i prowadzone z prędkościami obwodowymi V_1 i V_2 ($V_1 > V_2$), natomiast warstewki wewnątrz tworzywa są poddawane dość złożonym ruchom w zależności od położenia warstewki, określonego w układzie współrzędnych $x-y$, zwłaszcza po czynnej stronie (I) szczeliny (rys. 3.128). Prędkość kalandrowania, rozumiana jako prędkość wyprowadzania tworzywa z ostatniej szczeliny międzywalcowej, nie jest równoznaczna z prędkością obwodową ostatniej pary walców. W rezultacie odkształcenia sprężystego grubość folii h_2 jest większa niż minimalna szerokość szczeliny h_{min} i prędkość wyprowadzania folii staje się mniejsza.

Tworzywo podlega ciśnieniu p na odcinku od miejsca zapoczątkowania kontaktu rolki z walcem po czynnej stronie (I) szczeliny do miejsca utraty kontaktu z walcem przeciwległym po biernej stronie (II) szczeliny. Ciśnienie największe, działające na powierzchnię walców, występuje zawsze przed minimalną szerokością szczeliny, a w samej szczelinie według H. Breuera [3.137] osiąga połowę wartości największej.

Ciśnienie na powierzchni walców powoduje ich uginanie i poprzez to wpływa na zmianę grubości folii, jak również na ułożyskowanie walców.



Rys. 3.128. Przepływy tworzywa po czynnej stronie szczeliny międzywalcowej w obrębie rolki tworzywa

Pierwszą próbą analitycznego wyznaczania ciśnienia tworzywa jest niewątpliwie ujęcie G. Ardichviliego [3.4] przedstawione już w 1938 r. Przy założeniu, że tworzywo znajdujące się w szczelinie jest płynem niutonowskim i że proces jest izotermiczny, ciśnienie jest określone zależnością

$$p = 4\,\eta\,V_i\,\frac{\sqrt{R_w\,(h - h_{min})}}{h^2} \tag{3.96}$$

w której η oznacza lepkość dynamiczną tworzywa w szczelinie, natomiast $i = 1$ lub $i = 2$ w zależności od tego, względem powierzchni którego walca ciśnienie się wyznacza. Nacisk na walce, po czynnej stronie szczeliny, gdzie kalandruje się folia o szerokości l, wynosi

$$P = l \int_{h_{min}}^{H} p\,\mathrm{d}x \tag{3.97}$$

Nacisk po stronie biernej jest mały i może być pominięty. Po wprowadzeniu zależności geometrycznej

$$h = h_{min} + 2\left(R_w - \sqrt{R_w^2 - x^2}\right) \tag{3.98}$$

uproszczonej do

$$h = h_{min} + \frac{x^2}{R_w} \tag{3.99}$$

i scałkowaniu równania (3.97) otrzymuje się

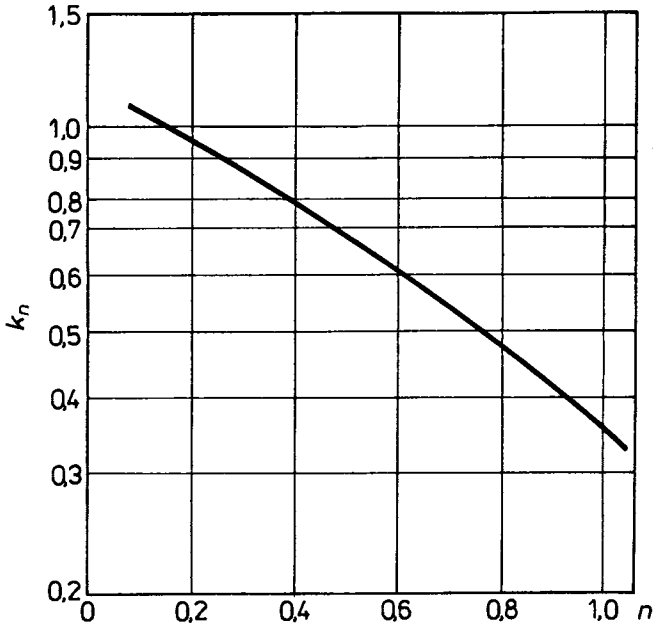
$$p = D_w\,l\,V_i\,\eta\left(\frac{1}{h_{min}} - \frac{1}{H}\right) \tag{3.100}$$

Ujęcie G. Ardichviliego było przytaczane powszechnie w literaturze, np. [3.99, 3.111, 3.144]. Inną próbę analitycznego wyznaczania ciśnienia tworzywa zaproponował R.E. Gaskell [3.58] w 1950 r. Oba ujęcia były wielokrotnie modyfikowane, przede wszystkim poprzez wprowadzanie matematycznego modelu potęgowego tworzywa kalandrowanego [3.9, 3.87, 3.98, 3.99].

Z nowszych ujęć na wyróżnienie zasługuje próba H. Potente [3.142] z 1983 r., w której ciśnienie maksymalne jest określone wzorem

$$p_{max} = k\left(\frac{V_i}{h_{min}}\right)^n \left(\sqrt{\frac{D_w}{h_{min}}}\right) k_c \tag{3.101}$$

gdzie k oraz n są parametrami matematycznego modelu potęgowego tworzywa, natomiast k_c stanowi współczynnik ciśnienia, zależny od parametru reologicznego n (rys. 3.129).



Rys. 3.129. Zależność współczynnika ciśnienia k_n od parametru reologicznego n matematycznego modelu potęgowego tworzywa [3.137, 3. 142]

Przepływy tworzywa w szczelinie międzywalcowej powodują znaczne ułożenie i wyprostowanie makrocząsteczek i cząstek zgodnie z kierunkiem kalandrowania. Efekt użytkowy wynikający z tego jest nazywany *efektem kalandrowania*. Podstawowy efekt kalandrowania stanowi zwiększenie wytrzymałości przy rozciąganiu folii i zmniejszenie jej wydłużenia w kierunku kalandrowania bez utraty spójności. Taka folia po nagrzaniu kurczy się w kierunku kalandrowania przy jednoczesnym zwiększaniu grubości, nie jest jednak zaliczana do folii termokurczliwych.

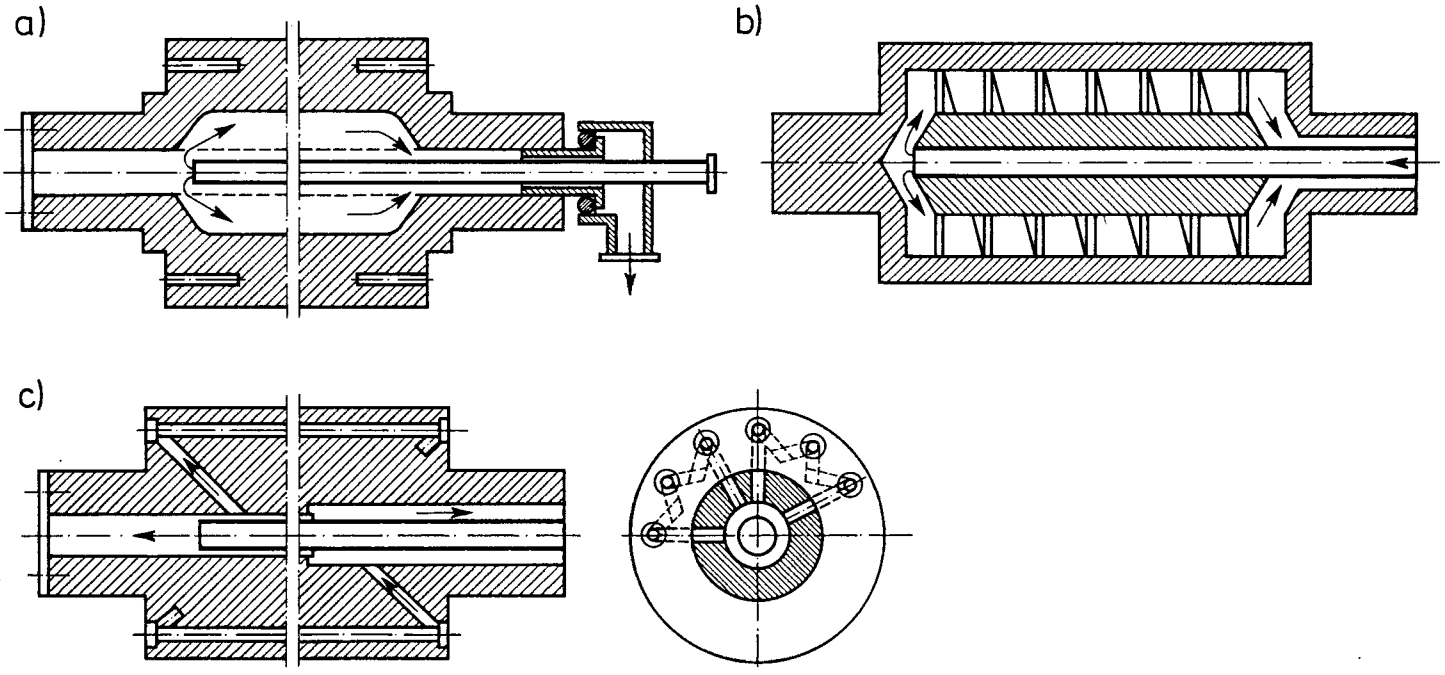
3.6.2. Kalandrowność

Walce kalandrujące są na ogół odlewami stalowymi lub żeliwnymi, mają średnicę zewnętrzną części roboczej w granicach 0,16 ÷ 0,95 m i długość tej części 0,32 ÷ 2,8 m. Stosunek średnicy do długości części roboczej jest zbliżony do 2,5. Chropowatość

części roboczej jest mała i wynosi zazwyczaj w przypadku walców do kalandrowania gumy i kauczuku maksymalnie $R_a = 0{,}8$ μm, natomiast w przypadku kalandrowania plastometrów termoplastycznych maksymalnie $R_a = 0{,}25$ μm. Twardość powierzchni roboczych powinna wynosić $48 \div 55$ HRC.

W każdym walcu kalandrującym można wyróżnić przede wszystkim scharakteryzowaną już część roboczą, mającą kanały do przepływu czynnika utrzymującego określoną temperaturę powierzchni walców, oraz czopy do łożyskowania, najczęściej tocznego, których jedna strona jest wykorzystywana do połączenia walców z układem grzejnym, a druga strona — do przeniesienia napędu.

Do najważniejszych problemów związanych z walcami kalandrującymi należy utrzymanie ustalonej temperatury, jednakowej (z przyjętą tolerancją) na całej powierzchni roboczej. Wpływa ona na lepkość tworzywa, przyczepność folii do powierzchni walców (większa przyczepność do walca o wyższej temperaturze) oraz na wymiary, strukturę i właściwości folii. Istotnym zagadnieniem są wymiary kanałów grzejnych oraz ich rozmieszczenie. W starszych rozwiązaniach stosowano centralną komorę grzejną, w której przepływał czynnik grzejny (rys. 3.130a). Ponieważ boki części roboczej walców miały nieuchronnie niższą temperaturę, stosowano dodatkowo ich ogrzewanie za pomocą grzejników elektrycznych trzpieniowych. W nowszych rozwiązaniach stosuje się centralny kanał śrubowy (rys. 3.130b) lub korzystniej — układ kanałów wierconych pod powierzchnią roboczą walców (rys. 3.130c).

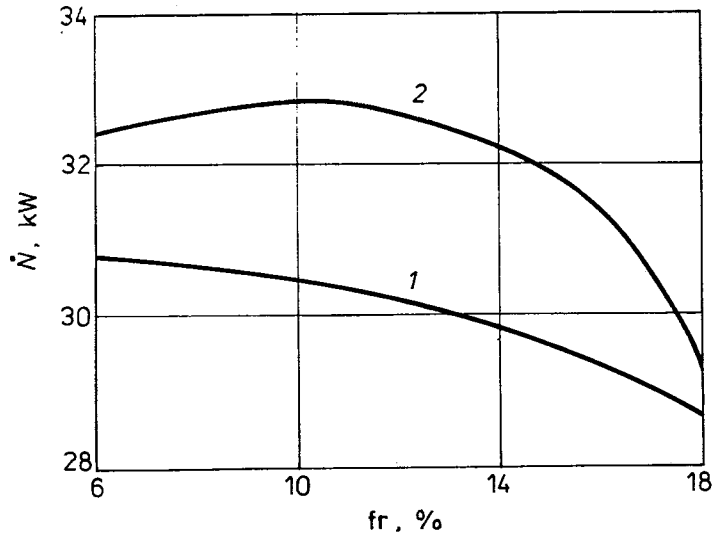


Rys. 3.130. Podstawowe rozwiązania układu grzejnego walców kalandra: a) z komorą centralną, b) ze śrubowym kanałem centralnym, c) z układem kanałów wierconych pod powierzchnią roboczą

Czynnikiem grzejnym dawniej była zazwyczaj para wodna, a obecnie jest przegrzana woda pod ciśnieniem. Temperaturę i natężenie przepływu czynnika grzejnego nastawia się i reguluje automatycznie w specjalnych urządzeniach, przed doprowadzeniem do poszczególnych walców. Do walców nie zawsze doprowadza się ciepło; podczas kalandrowania gumy, kauczuku w normalnych warunkach i plastomerów termo-

plastycznych z dużą prędkością kalandrowania często zachodzi konieczność odprowadzenia ciepła, generowanego wskutek tarcia, głównie wewnętrznego.

Zazwyczaj z powiększaniem się minimalnej szerokości szczeliny międzywalcowej rośnie wydajność procesu kalandrowania i spada pobór energii potrzebnej do kalandrowania, natomiast ze wzrostem prędkości kalandrowania zwiększają się obie wymienione wielkości [3.102, 3.136]. Wzrost frykcji powoduje na ogół zmniejszanie poboru mocy (rys. 3.131). Proces kalandrowania bywa również optymalizowany; jako kryterium optymalizacji przyjmuje się na przykład wydajność procesu (maksymalizowaną) lub zużycie energii (minimalizowane) [3.20].



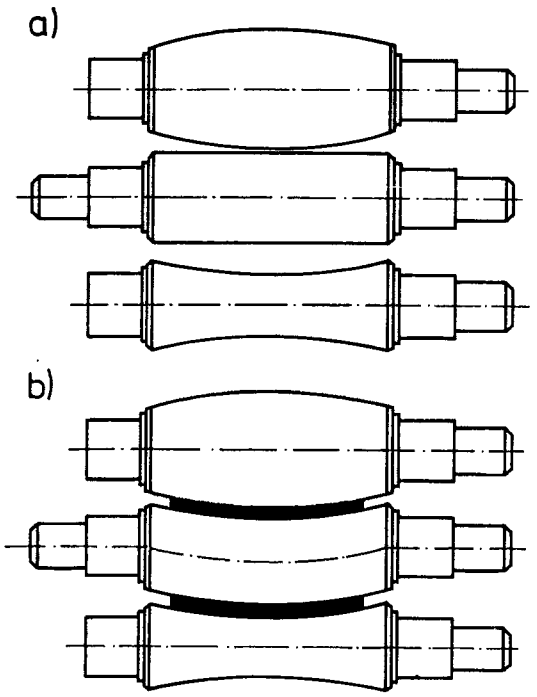
Rys. 3.131. Zależność poboru mocy $\dot{N}$ przez kalander pięciowalcowy o układzie walców F od frykcji fr wyrażonej w procentach, podczas kalandrowania PVC zmiękczonego: *1* — frykcja walców 3/2, *2* — frykcja walców 4/3 [3.19]

Ciśnienie w szczelinie międzywalcowej powoduje nacisk na wale [wzory (3.96) i (3.99)], który można odnieść do długości części roboczej walca, uzyskując nacisk jednostkowy. Zawiera się on w granicach $500 \div 10\,000$ N/cm i powoduje ugięcie walców w części środkowej nawet do 600 μm [3.137]. Walce uginają się również pod wpływem ciężaru własnego. Łączne ugięcie walców może być więc znaczne. Wpływa ono na szerokość szczeliny międzywalcowej i poprzez to na grubość folii; folia w części środkowej walców miałaby większą grubość niż w pobliżu boków. Zapobiega się temu kompensując ugięcie walców, szczególnie w praktyce, gdy ich średnica jest większa od 0,5 m [3.140].

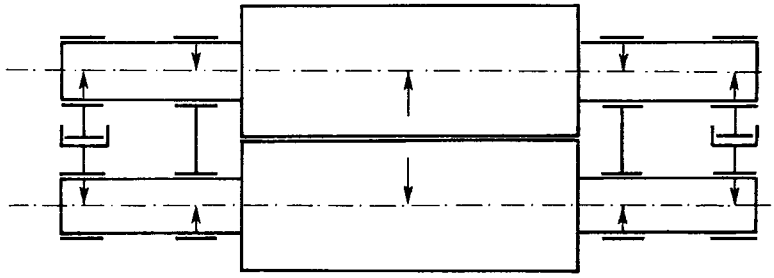
Pospolitym sposobem kompensacji ugięcia walców jest nadanie niektórym walcom kształtu paraboloidalnego, co często nazywa się krótko *bombażem*. Jedno z takich rozwiązań w przypadku układu trójwalcowego I pokazano na rys. 3.132. Sposobem tym można zadowalająco kompensować ugięcie walców tylko w warunkach kalandrowania odpowiadających paraboloidalności walców i nie nadaje się on do regulacji ciągłej kompensacji ugięcia.

Innym sposobem kompensacji ugięcia walców jest wywołanie w nich naprężeń zginających skierowanych przeciwnie do naprężeń pochodzących od nacisku jednostkowego i ciężaru walców. Realizuje się to w ten sposób, że na przedłużonych czopach

Rys. 3.132. Walce kalandra w układzie trójwalcowym I z bombażem: a) kształt poszczególnych walców, b) współpraca walców zapewniająca jednakową grubość folii

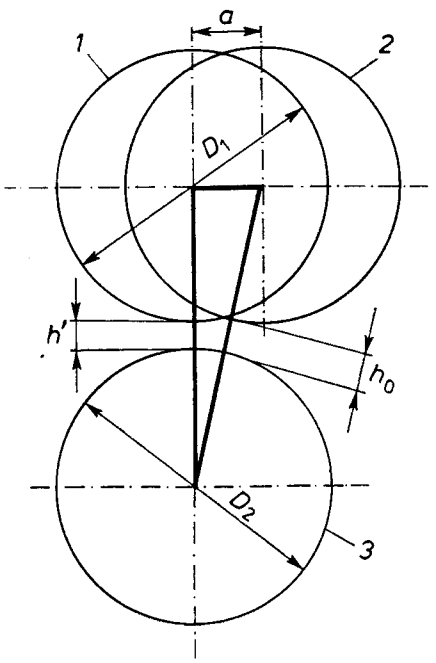


walców umieszcza się łożyska pomocnicze i obciąża się je w żądanym kierunku za pomocą układów hydraulicznych lub sprężynowych o regulowanej sile. Na przykład w walcu trzecim i czwartym wywołuje się naprężenie wskutek przyłożenia do łożysk pomocniczych sił rozpychających (rys. 3.133). Sposób ten umożliwia ciągłe i efektywne kompensowanie ugięcia walców, ale komplikuje budowę i eksploatację kalandra.



Rys. 3.133. Schemat układu walca trzeciego i czwartego z kompensacją ugięcia poprzez wywołanie naprężeń zginających przeciwnie skierowanych w stosunku do naprężeń pochodzących od nacisku jednostkowego i ciężaru walców [3.115]

Ugięcie walców można również kompensować wichrowaniem ich osi (krzyżowanie walców [3.115], skosowanie walców [3.18], przekoszenie walców [3.99, 3.198]). Na rysunku 3.134 przedstawiono schematycznie w przekroju poprzecznym dwa walce o osiach zwichrowanych. Wichrowatość uzyskuje się wskutek jednoczesnego lub niezależnego przesunięcia poziomego o wielkość a obu łożysk głównych jednego walca. Na ogół zachodzi potrzeba określenia wartości tego przesunięcia. Stosując oznaczenia podane na rysunku można przyjąć, że jeżeli nominalna szerokość szczeliny międzywalcowej wynosi h', to poprzez ugięcie walców w środkowej ich części, h' przechodzi w h_{min} (rys. 3.127), przy czym $h' < h_{min}$. Należy zauważyć, że h_{min} bezpośrednio determinuje na ogół z góry założoną wartość h_2 oraz że wartość



Rys. 3.134. Rysunek pomocniczy do wyznaczenia przesunięcia a osi jednego z walców kalandra: *1* — walec górny przed przesunięciem osi, *2* — walec górny po przesunięciu osi, *3* — walec dolny nieruchomy

nominalnej szerokości szczeliny można z wystarczającą dokładnością zmierzyć na końcach walców (gdyby walce nie uginały się, byłaby ona stała wzdłuż tworzącej walców). Zwiększenie szerokości szczeliny z h' do $h_{\min}$ jest równoważone przez wielkość h_0, zatem

$$h_{\min} = h_0 \tag{3.102}$$

Z analizy ugięć walców górnego i dolnego (rys. 3.135) wynika, że

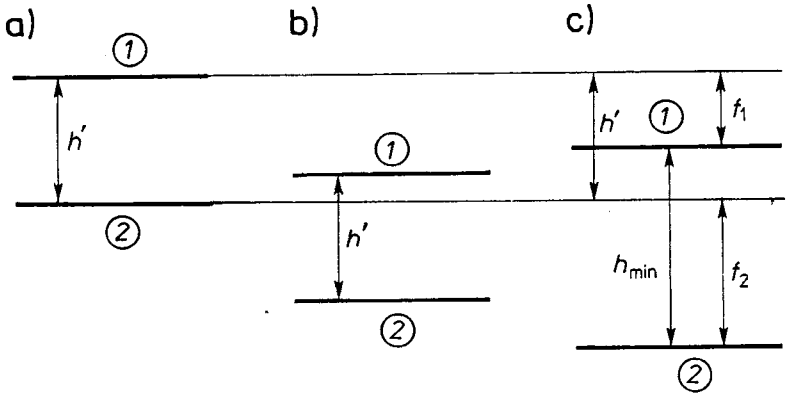
$$h' + f_2 = h_{\min} + f_1 \tag{3.103}$$

stąd

$$h_{\min} - h' = f_2 - f_1 \tag{3.104}$$

Na podstawie rysunku 3.134 można napisać

$$\left(\frac{D_1}{2} + \frac{D_2}{2} + h'\right)^2 + a^2 = \left(\frac{D_1}{2} + \frac{D_2}{2} + h_0\right)^2 \tag{3.105}$$



Rys. 3.135. Schematyczne przedstawienie położenia tworzącej dolnej walca górnego ① i tworzącej górnej walca dolnego ② w przypadku: a) gdy walce nie uginają się (nierealne), b) przy ugięciu walców bez folii między nimi, c) przy ugięciu w procesie kalandrowania; f_1 — rzeczywista strzałka ugięcia walca górnego, f_2 — rzeczywista strzałka ugięcia walca dolnego

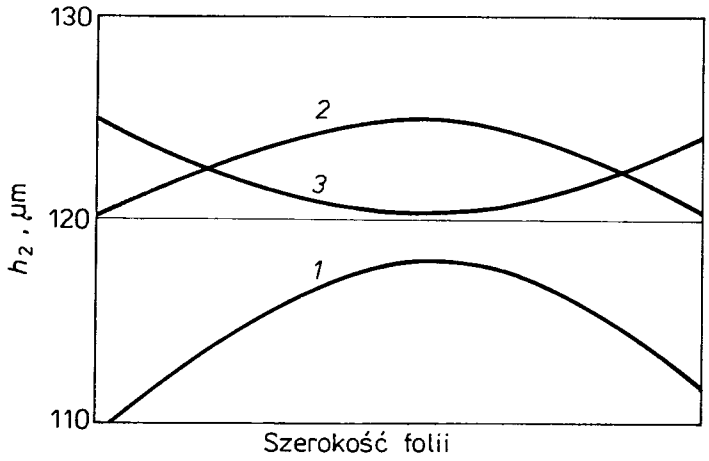
Przyjmując, że walce mają jednakowe średnice, czyli $D_1 = D_2 = D$, z przekształcenia zależności (3.105) otrzymuje się

$$a = \sqrt{2D(h_0 - h') + h_0^2 - (h')^2} \tag{3.106}$$

Podstawiając do tej zależności wzór (3.104) z uwzględnieniem (3.102) uzyskuje się

$$a = \sqrt{2D(f_2 - f_1) + h_0^2 - (h')^2} \tag{3.107}$$

Rzeczywiste strzałki ugięcia walców f_1 oraz f_2 wyznacza się na podstawie wiadomości z wytrzymałości materiałów. Ze wzoru (3.107) można obliczyć potrzebne przesunięcie osi jednego z walców. Wynosi ono przeciętnie od kilku do kilkunastu milimetrów, a maksymalne nie przekracza 30 mm [3.99]. Na rysunku 3.136 pokazano wpływ przesunięcia a osi walca kalandra na grubość folii mierzoną wzdłuż jej szerokości. Na ogół wichrowaniu poddaje się oś walca trzeciego w stosunku do osi obu walców sąsiednich, przez co koryguje się jednocześnie obie szczeliny.



Rys. 3.136. Zależność grubości h_2 folii PVC od przesunięcia (a) osi walca, mierzonej wzdłuż jej szerokości: *1* — $a = 0$, *2* — $a = 4$ mm, *3* — $a = 8$ mm [3.83]

Ugięcie walców można wreszcie kompensować rozkładem temperatury walców wzdłuż tworzącej. Temperatura wpływa na lepkość tworzywa, a więc na warunki jego przepływu w szczelinie, jak również na rozszerzalność cieplną walców, np. różnica temperatury 4°C wywołuje przy walcu o średnicy 610 mm zmianę średnicy o 0,025 mm [3.141].

Praktycznie stosuje się jednocześnie kilka sposobów kompensacji ugięcia walców, na przykład paraboloidalność walców jako sposób podstawowy i wichrowanie osi jako sposób uzupełniający.

3.7. Mieszanie

Mieszanie jest procesem przetwórstwa, który stosuje się jako operację wstępną do wielu innych procesów przetwórstwa, dlatego jego udział we wszystkich metodach przetwórstwa jest bardzo znaczny.

Mieszanie polega na dokładnym rozprowadzeniu składników w układzie wieloskładnikowym ciekłym, plastycznym i stałym w kształcie granulek lub proszku (w

układzie sypkim) oraz na jego ujednorodnieniu (zhomogenizowaniu). Jednorodność polega na tym, że każda dowolnie mała objętość mieszaniny ma taki skład, jak skład użyty do wytworzenia tej mieszaniny. Na przykład miesza się żywicę w stanie ciekłym lub plastycznym z napełniaczem i środkiem barwiącym w stanie stałym oraz utwardzaczem w stanie ciekłym. W tych przypadkach tworzywo wyjściowe z procesu mieszania nazywane jest ogólnie *przetworem* [3.156].

Mieszanina stanowi materiał wejściowy do dalszych procesów przetwórstwa:

— bezpośrednio, np. do kalandrowania, odlewania, laminowania, nanoszenia, klejenia i prasowania płytowego,

— pośrednio, np. do wtryskiwania, wytłaczania, prasowania tłocznego i przetłocznego — wówczas jest ona po procesie mieszania zestalana bądź utwardzana w postaci zróżnicowanych geometrycznie ziarn i następnie rozdrabniana na proszek i dalej często granulowana lub tabletkowana.

3.7.1. Charakterystyka ogólna

W przetwórstwie największe znaczenie ma mieszanie mechaniczne, czyli mieszanie, w którym dominujące znaczenie mają zjawiska mechaniczne, przede wszystkim ruch wzajemny materiałów mieszanych, oraz mieszanie mechaniczno-cieplne, w którym obok zjawisk mechanicznych istotne znaczenie mają zjawiska cieplne, głównie przenoszenie ciepła i stapianie.

Mieszanie mechaniczne odbywa się w mieszarkach (mieszalnikach), gdzie narzędziem są mieszadła: ramy, kotwice, skrzydła, wstęgi, łapy, śmigła, turbiny, ślimaki, wykonujące ruch obrotowy lub planetarny. W związku z tym rozróżnia się mieszarki o nazwach tworzonych od nazw mieszadeł, np. mieszarki ramowe, kotwicowe, skrzydłowe, wstęgowe itd. Proces mieszania zachodzący w tych mieszarkach nazywa się odpowiednio mieszaniem ramowym, kotwicowym, skrzydłowym, wstęgowym itd. Znane są również rozwiązania mieszania mechanicznego bez użycia mieszadła w ścisłym tego słowa znaczeniu, np. mieszanie bębnowe lub komorowe.

Mieszanie mechaniczno-cieplne odbywa się przede wszystkim w układzie walcowym bądź ślimakowym, a więc może ono być mieszaniem walcowym lub ślimakowym. W mieszaniu walcowym narzędziem mogą być walce kołowe i wówczas mieszarka nosi nazwę *walcarki*, a proces nazwę *walcowania*, jeżeli natomiast narzędziem są walcowe elementy niekołowe, zwane gniotownikami, to mieszarka nazywa się *gniotownikiem* proces zaś *ugniataniem*. Mieszanie ślimakowe zachodzi w układzie uplastyczniającym, zwłaszcza skonstruowanym tak, aby dominowała w nim funkcja mieszania.

Poza tym w przetwórstwie stosuje się, ale już rzadziej, inne rodzaje mieszania, na przykład [3.133], gdy zachodzi potrzeba zmieszania dwu tworzyw nie mieszających się, wówczas rozpuszcza się je we wspólnym rozpuszczalniku i następnie rozpuszczalnik szybko się odparowuje. Cząstki tak otrzymanej mieszaniny mają rozmiary $0{,}5 \div 20$ μm.

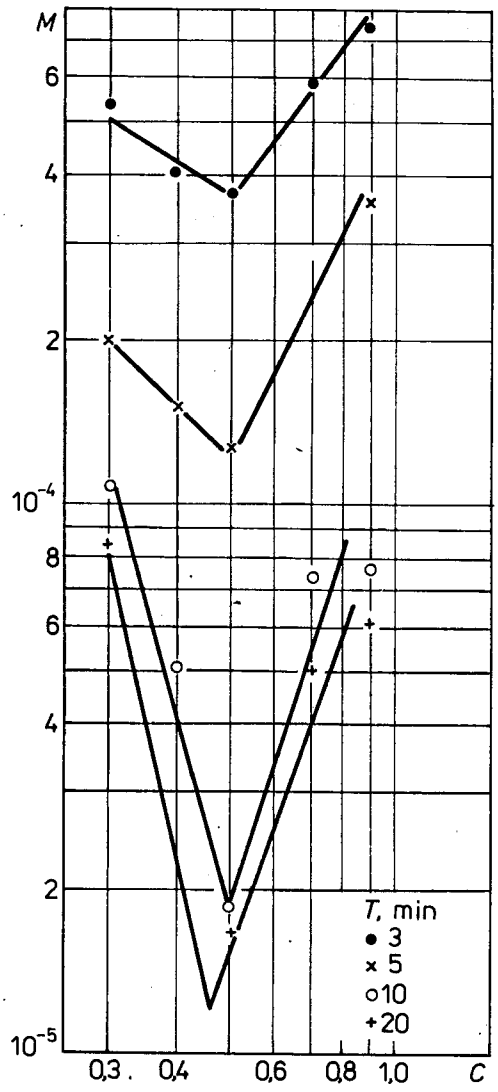
Mieszanie stwarza określone problemy [3.192] wynikające między innymi z dużej różnicy lepkości materiałów mieszanych, np. stosunek lepkości polistyrenu do lepkości styrenu wynosi $1000 \div 10\,000$ [3.44], że znacznej różnicy gęstości, wilgotności i innych właściwości oraz wreszcie ze znacznej różnicy kształtu i rozmiarów ziarn.

Ocena stopnia jednorodności mieszaniny opiera się głównie na analizie statystycznej mieszanego składu, proces mieszania bowiem ma charakter stochastyczny. Stochastyczna ocena stanu odchylenia mieszaniny od pewnego stanu idealnego może być zatem miarą jej jednorodności. Statystyczną miarą stanu mieszaniny jest *stopień zmieszania* (wymieszania). Za podstawowy stopień zmieszania mieszaniny dwuskładnikowej uważa się powszechnie odchylenie standardowe S i jego wariancję S^2

$$S^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2 \tag{3.108}$$

gdzie N oznacza liczbę wybranych próbek z mieszaniny, x_i — i-tą wartość wielkości reprezentującej stężenie lub inną cechę w badanej próbie, $\bar{x}$ — średnią arytmetyczną tej wielkości ze wszystkich próbek

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} x_i \tag{3.109}$$



Rys. 3.137. Zależność stopnia zmieszania M od stopnia wypełnienia C bębna mieszarki bębnowej typu V przy różnych czasach mieszania kopolimeru E/P ze środkiem barwiącym — oranżem metylowym, przy prędkości obrotowej mieszarki około 1 s^{-1} [3.203]

Posługiwanie się wielkościami S oraz S^2 okazało się w wielu przypadkach mało efektywne i w związku z tym opracowano dużo postaci matematycznych stopnia zmieszania. Zestawienie i omówienie ważniejszych z nich, w liczbie 37, podaje J. Bross [3.24]. Popularnymi postaciami matematycznymi stopnia zmieszania są ilorazy

$$I = \frac{S}{\bar{x}} \tag{3.110}$$

oraz

$$M = \frac{S^2}{S_0^2} \tag{3.111}$$

jak również

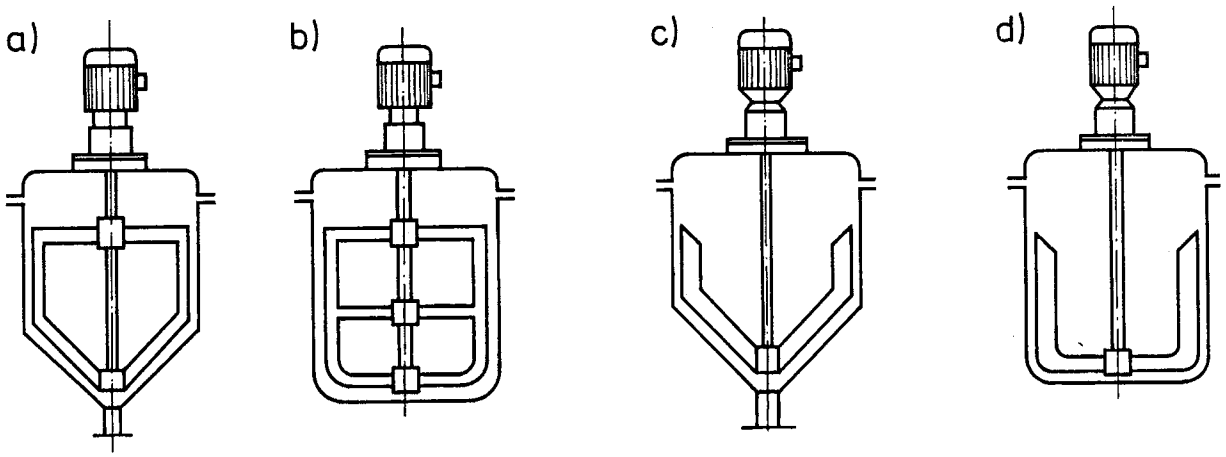
$$R = 1 - \frac{S}{100} \tag{3.112}$$

gdzie S_0^2 oznacza wariancję dla mieszaniny w stanie całkowitej segregacji (przed zmieszaniem). Wartości M mogą być rzędu $10^{-5} \div 10^{-3}$ (rys. 3.137), wartości I mogą być rzędu od kilku do kilkunastu [3.44], natomiast wartości R nie przekraczają 1 [3.184].

Stopień jednorodności mieszaniny można również oceniać na podstawie metod niestatystycznych. Niestatystyczna miara stanu mieszaniny nazywa się, w odróżnieniu od statystycznej, *indeksem zmieszania*. Interesującą analizę kilkunastu ważniejszych postaci matematycznych indeksu zmieszania przedstawił również J. Bross [3.24].

3.7.2. Mieszanie mechaniczne

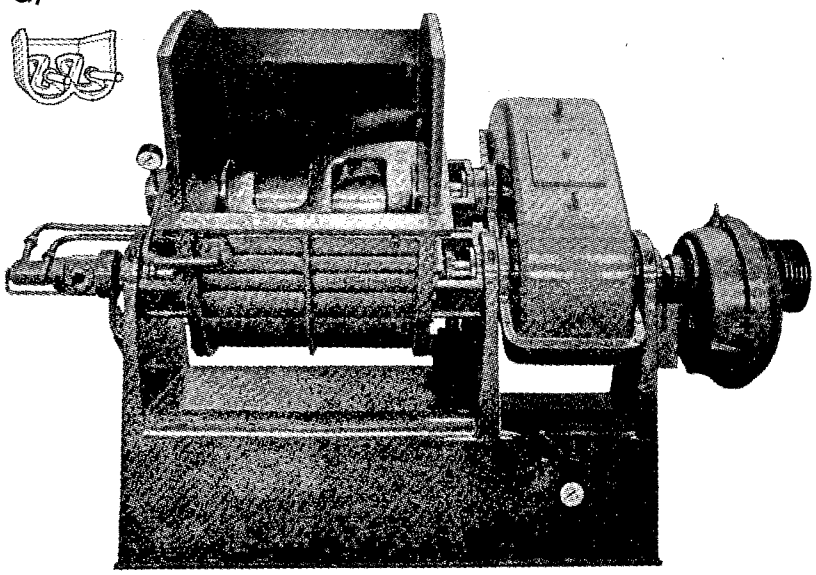
Na rysunku 3.138 przedstawiono przykładowo schematy różnych rozwiązań mieszarek ramowych i kotwicowych, w których mieszadła wykonują tylko ruch obrotowy wokół własnej osi. Mieszarki te stosuje się najczęściej do tworzyw w stanie



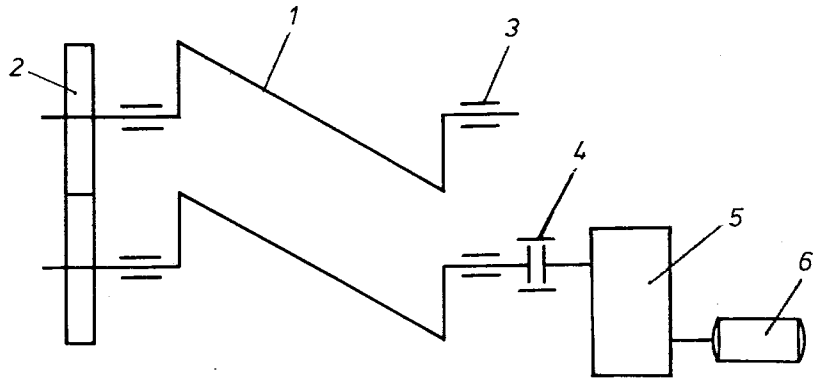
Rys. 3.138. Schematy różnych rozwiązań mieszarek ramowych (a) i (b) oraz kotwicowych (c) i (d), w których mieszadła wykonują ruch obrotowy wokół własnej osi

ciekłym lub plastycznym. Z kolei na rys. 3.139 pokazano mieszarkę skrzydłową, w której proces mieszania następuje wskutek ruchu obrotowego dwu identycznych skrzydeł w kształcie litery Z — dlatego mieszarkę tę nazywa się mieszarką dwu-

a)

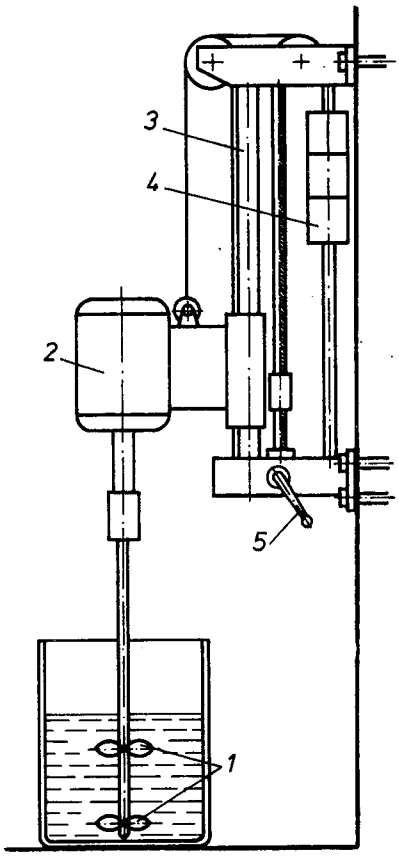


b)

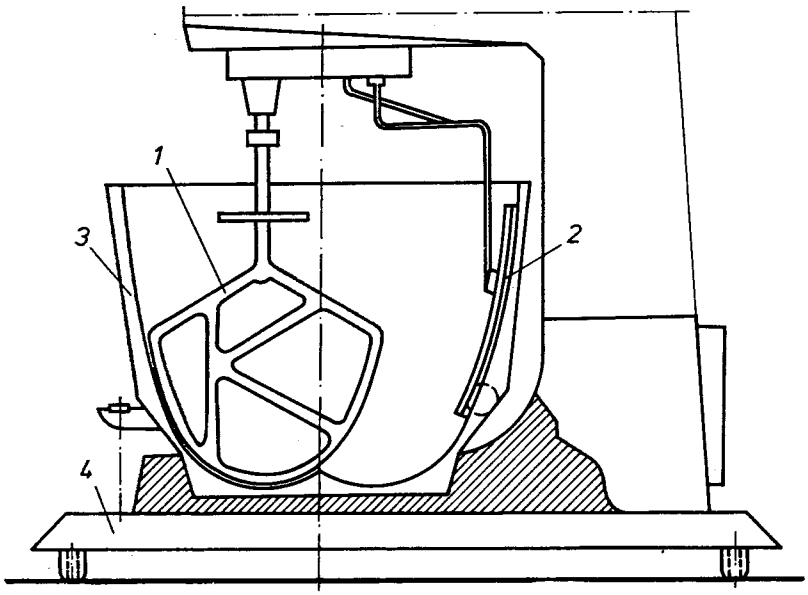


Rys. 3.139. Mieszarka dwumieszadłowa zetowa: a) wygląd ogólny (mieszarka firmy Werner und Pfleiderer — Niemcy), b) schemat kinematyczny (przykład); *1* — mieszadła zetowe, *2* — przekładnia rozdzielcza, *3* — łożyska, *4* — sprzęgło przeciążeniowe, *5* — przekładnia napędowa, *6* — silnik napędowy elektryczny

mieszadłową zetową. Jest ona stosowana efektywnie do sporządzania tłoczyw proszkowych. W mieszarce śmigłowej, śmigło ma kształt zbliżony do śruby okrętowej i jest osadzone na wale wykonującym ruch obrotowy. Intensywność mieszania ulega powiększeniu, jeżeli na wale mocuje się więcej niż jedno śmigło (rys. 3.140). Mieszarki śmigłowe stosuje się głównie do tworzyw w stanie ciekłym. Na rysunku 3.141 jest pokazana mieszarka Kenwooda, mająca dwa różne mieszadła: ramowe wykonujące ruch planetarny, zasadniczy dla procesu mieszania i łapowe wykonujące ruch obrotowy wokół osi misy mieszarki w celu zgarniania tworzywa przywierającego do powierzchni wewnętrznej misy. Mieszarkę tę stosuje się m.in. do past PVC [3.139]; w tym przypadku prędkość obrotowa obu mieszadeł wynosi 0,33 s^{-1} i 1 s^{-1} przy średnicy maksymalnej misy 224 mm (średnica maksymalna mieszadła ramowego wynosi 136 mm). Mieszarki ślimakowe stosuje się głównie do tworzyw w stanie stałym. Mają one na ogół większe rozmiary i duże wydajności. Na przykład mieszarki te mogą być stosowane do mieszania tworzywa w zbiornikach (rys. 3.142), jednocześnie ułatwiającego ich opróżnianie, gdzie ślimak wykonuje ruch obrotowy wokół własnej



Rys. 3.140. Schemat mieszarki dwuśmigłowej: *1* — śmigła, *2* — silnik napędowy elektryczny, *3* — kolumna prowadząca, *4* — przeciwciężar, *5* — korba do podnoszenia i opuszczania mieszadła

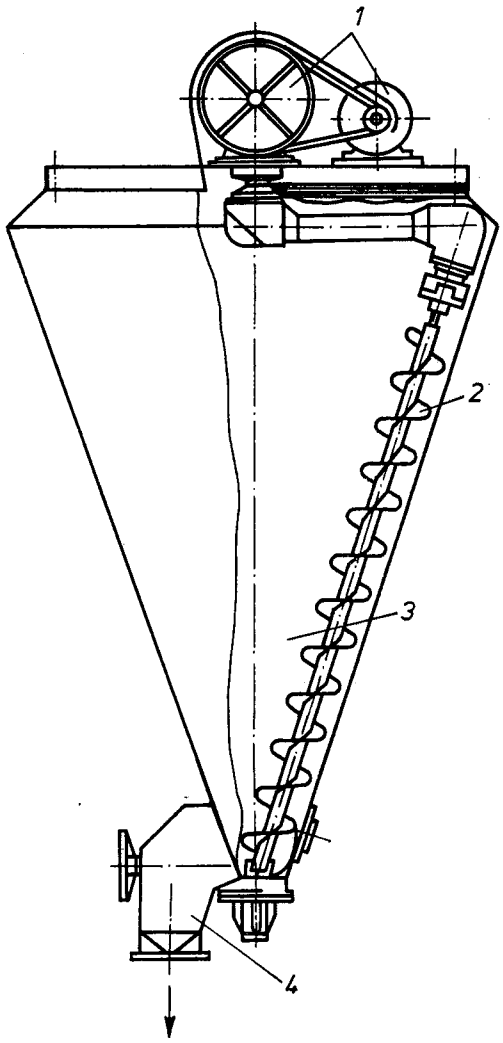


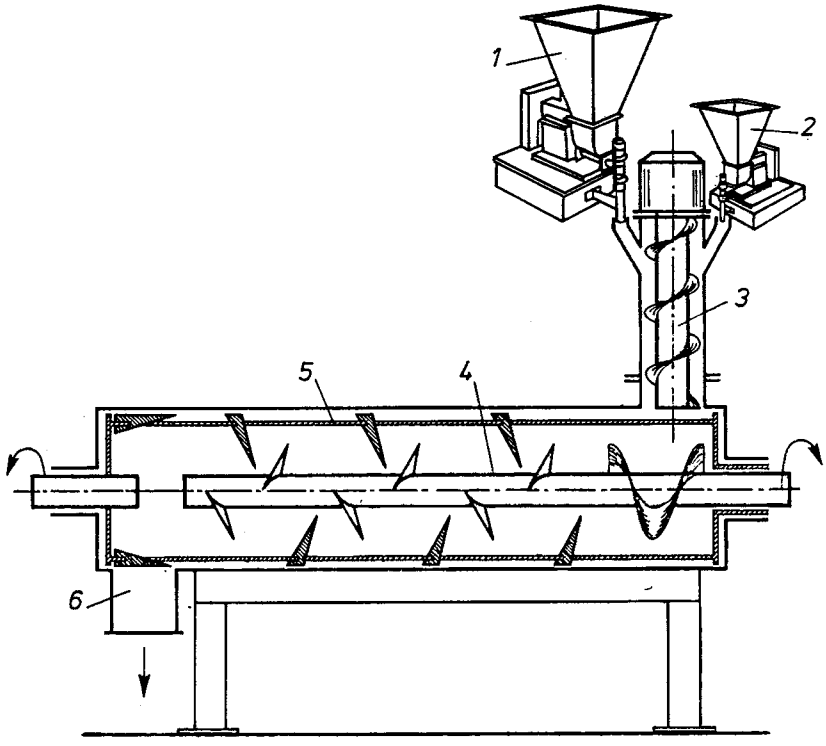
Rys. 3.141. Schemat mieszarki dwumieszadłowej Kenwooda: *1* — mieszadło ramowe, *2* — mieszadło łapowe, *3* — podwójne ścianki misy do przepływu cieczy regulującej temperaturę, *4* — podstawa mieszarki

osi, a w górnej części ruch planetarny, badź do mieszania intensywnego na przykład w układzie kombinowanym (rys. 3.143).

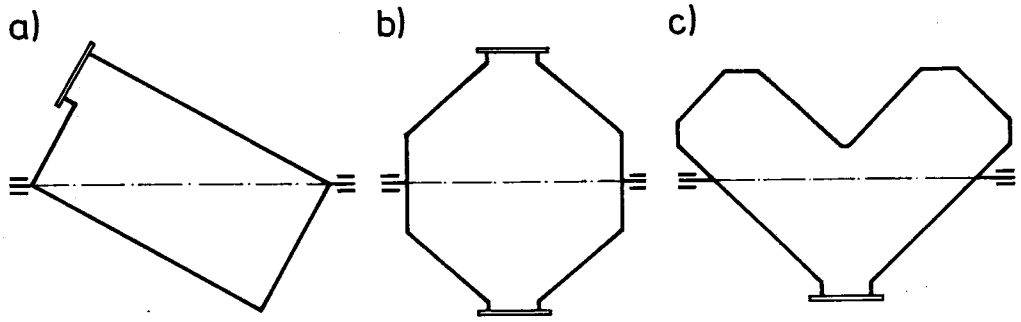
Mieszanie bębnowe stosuje się najczęściej do tworzyw w stanie stałym. Rozprowadzanie składników podczas tego mieszania zachodzi na skutek swobodnego ich przesypywania się podczas ruchu obrotowego bębna mieszarki, w którym się znajdują (rys. 3.144).

Rys. 3.142. Schemat mieszarki ślimakowo-stożkowej: *1* — układ napędowy, *2* — ślimak, *3* — zbiornik stożkowy, *4* — urządzenie spustowe

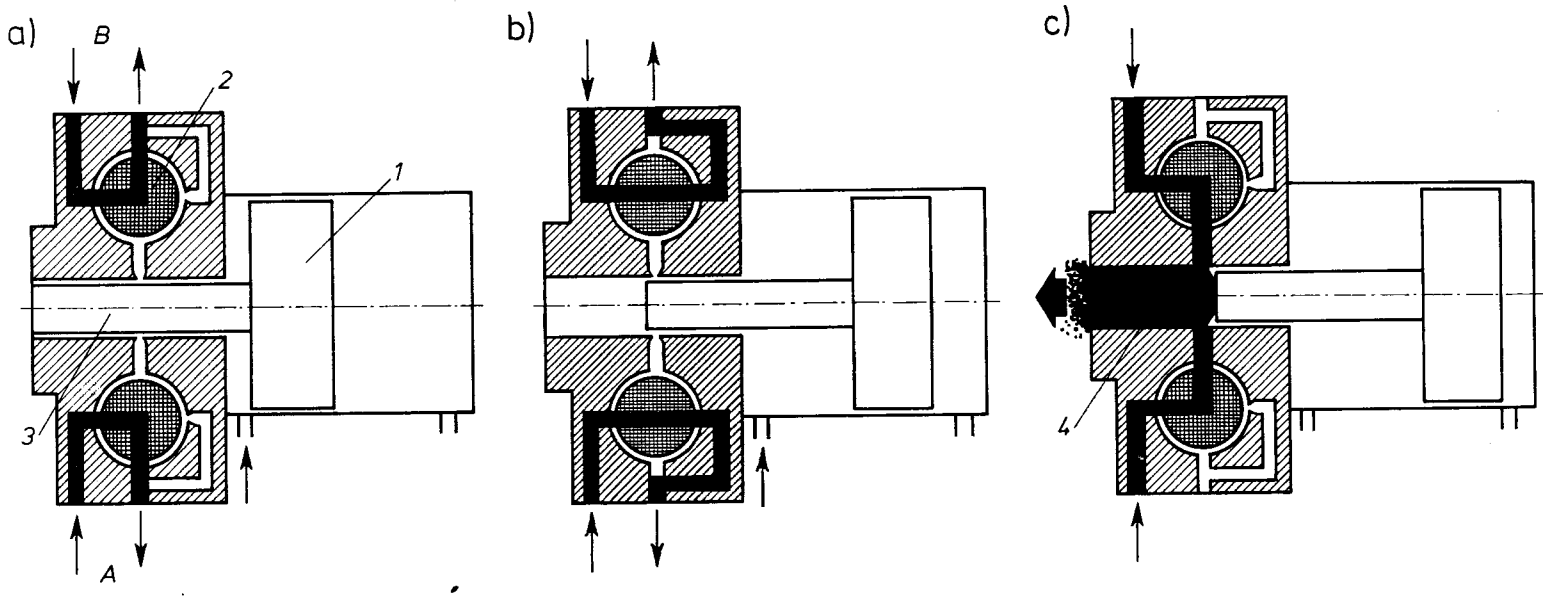




Rys. 3.143. Schemat mieszarki ślimakowej kombinowanej: *1* — dozowanie składnika A, *2* — dozowanie składnika B, *3* — krótki obracający się ślimak pionowy o ciągłym kanale śrubowym, *4* — obracający się ślimak z występami mieszającymi, *5* — obracający się cylinder z występami mieszającymi, *6* — wylot mieszaniny [3.126]

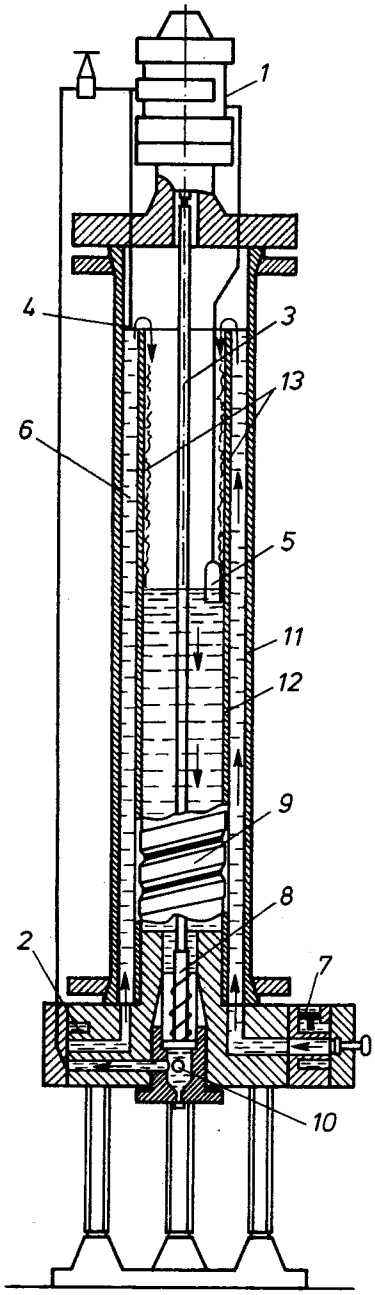


Rys. 3.144. Schematy niektórych mieszarek bębnowych: a) prostokątna, b) dwustożkowa, c) typu V



Rys. 3.145. Zasada działania głowicy mieszającej do przetwórstwa PUR metodą RIM według firmy Cannon (Włochy): a) cyrkulacja niskociśnieniowa, b) cyrkulacja wysokociśnieniowa, c) wtrysk składników i początek dozowania mieszaniny; oznaczenia w tekście

Mieszanie komorowe natomiast stosuje się wyłącznie do tworzyw w stanie ciekłym. Składniki są rozprowadzane w komorze na skutek dynamicznego rozdzielania ich strumieni, często skierowanych naprzeciw siebie w układzie przeciwprądowo-wtryskowym. Znalazło ono największe zastosowanie przy przetwórstwie PUR, gdzie proces mieszania odbywa się w czasie nawet 0,5 s w głowicy mieszającej, sprzężonej z układem podającym pod ciśnieniem składniki z wydajnością do 6 kg/s. Na rysunku 3.145 przedstwiono istotę jednego z wielu rozwiązań głowicy mieszającej. Składniki *A* i *B* są podawane pod ciśnieniem do głowicy i cyrkulują pomiędzy nią a zbiornikami. Tłok (*1*) przesuwa się w prawe skrajne położenie. Zawór trójdrożny (*2*) zmienia swoje położenie, przez co zwiększa się długość kanałów cyrkulacyjnych w głowicy, powiększają się opory przepływu, co w konsekwencji powoduje wzrost ciśnienia składników wpływających do głowicy, nadal cyrkulujących. Gdy ciśnienie osiąga żądaną wartość, a tłok (*1*) osiągnie położenie skrajne, poprzez zmianę położenia



Rys. 3.146. Urządzenie do odgazowywania mieszanin ciekłych: *1* — silnik pneumatyczny, *2* — zawór obiegu wewnętrznego, *3* — wał napędzający pompę ślimakową, *4* — przelewająca się mieszanina, *5* — czujnik poziomu mieszaniny w rurze wewnętrznej, *6* — obszar cylindryczny wypełniony mieszaniną, *7* — zawór wlotowy, *8* — pompa ślimakowa, *9* — elektryczny grzejnik rezystancyjny, *10* — odpływ, *11* — rura zewnętrzna, *12* — rura wewnętrzna, *13* — warstwa mieszaniny spływająca po ściance [3.149]

zaworu (*2*), następuje wtrysk naprzeciw siebie strumieni obu składników *A* i *B*. Następnie poprzez ruch w przeciwnym kierunku tłoka (*1*) odbywa się dozowanie tłoczyskiem (*3*) określonej ilości mieszaniny (*4*). Po tym cykl działania głowicy mieszającej rozpoczyna się od początku.

W procesie mieszania z użyciem mieszadeł, w którym choć jeden ze składników znajduje się w stanie ciekłym lub plastycznym, zachodzi nieuchronnie wprowadzanie do mieszaniny powietrza, przyjmującego postać pęcherzy. Produkty gazowe mogą również powstawać w samej mieszaninie. Powoduje to niekontrolowaną, przypadkową porowatość wytworów otrzymanych z takiej mieszaniny, pociągając za sobą pogarszanie jakości wytworów, często poniżej przyjętego poziomu. Odgazowanie mieszaniny jest więc zazwyczaj konieczne. Na ogół odbywa się ono pod ciśnieniem niższym od ciśnienia atmosferycznego, czyli w warunkach podciśnienia.

Istnieją dwa zasadnicze sposoby odgazowywania mieszaniny: w spoczynku i w ruchu. Sposób pierwszy polega na umieszczeniu mieszaniny w szczelnie zamkniętym naczyniu, połączonym z pompą próżniową, umożliwiającą uzyskanie w tym naczyniu ciśnienia o wartości kilkuset paskali, np. w przypadku past PVC poniżej 650 Pa [3.51]. Odgazowywanie to przebiega w sposób burzliwy, znacznie zwiększając objętość mieszaniny w procesie odgazowywania, i jest stosowane do małych ilości mieszaniny. Sposób drugi polega na tym, że mieszanina spływa cienką warstwą po określonej powierzchni w warunkach podciśnienia, gdzie następuje pękanie pęcherzy i uwalnianie gazu. Przeprowadza się je w prosty sposób poprzez spływanie mieszaniny po równi pochyłej [3.51], ale znane są też rozwiązania bardziej złożone o większej wydajności (rys. 3.146), w których dodatkowo podgrzewa się mieszaninę. Współdziałanie ruchu, podciśnienia i podwyższonej temperatury umożliwia usunięcie 97% gazów.

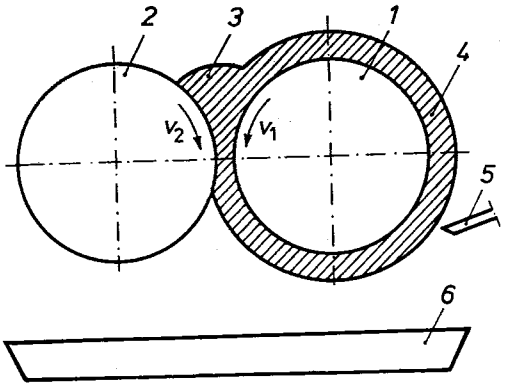
3.7.3. Mieszanie mechaniczno-cieplne

Mieszanie mechaniczno-cieplne obejmuje głównie walcowanie, ugniatanie i mieszanie w układzie uplastyczniającym.

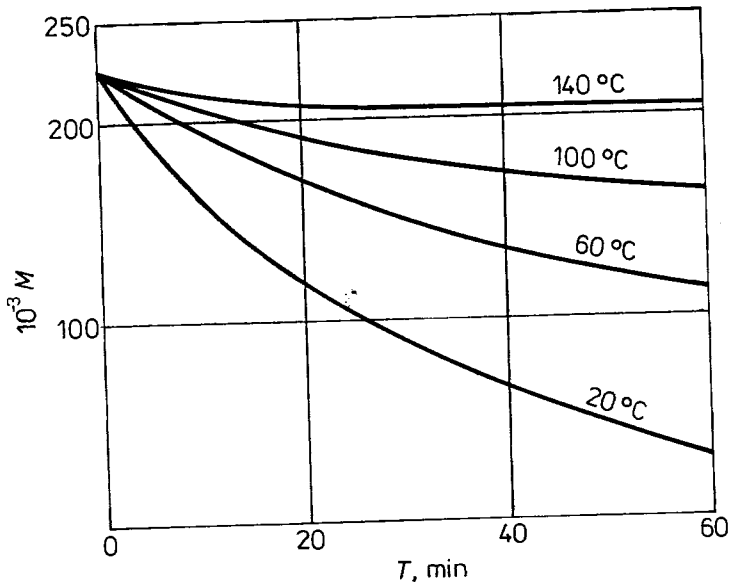
Walcowanie

Do mieszania tworzyw w stanie plastycznym stosuje się często walcowanie. Zjawiska zachodzące podczas walcowania w swej istocie nie różnią się od zjawisk występujących w czasie kalandrowania. Walcowanie może się odbywać za pomocą jednego, dwu lub trzech walców.

Walcowanie za pomocą dwu walców jest szczególnie często stosowane. Aby uzyskać znaczny efekt mieszania, frykcja jest stosunkowo duża i wynosi $1{,}2 \div 1{,}5$, a tworzywo zostaje wielokrotnie wprowadzane do szczeliny międzywalcowej (w procesie kalandrowania — tylko raz w odniesieniu do danej pary walców kalandrujących). Znaczna wartość frykcji powoduje nie tylko rozprowadzanie składników, ale również pewne ich rozcieranie. Na rysunku 3.147 przedstawiono schemat tego walcowania. Materiały wejściowe w odpowiednich stosunkach wprowadza się porcjami do szczeliny międzywalcowej, o szerokości dziesiątych części milimetra, regulowanej rozstawieniem walców. W czasie walcowania tworzywo, które początkowo przywierało do obu walców, gromadzi się na jednym z nich — termoplastyczne na ogrzewanym walcu gorętszym, a utwardzalne na ogrzewanym walcu chłodniejszym. Różnica temperatury między walcami przeciętnie jest rzędu $20 \div 30$ K. Podczas walcowania kauczuków ilość generowanego ciepła tarcia jest tak duża, że niekiedy występuje konieczność chłodzenia walców. Przywarty do walca płat tworzywa rozcina się, zdejmuje z walca, zwija, następnie obraca o kąt $(\pi/2)$ rad i ponownie wprowadza między walce. Operację tę powtarza się kilkakrotnie. Do podstawowych warunków walcowania zalicza się temperaturę walców, która np. dla PVC może wynosić 130°C i 160°C, a dla tworzyw utwardzalnych 80°C i 110°C, oraz czas walcowania, na ogół wynoszący kilkanaście minut. Proces walcowania powoduje pewną degradację tworzywa, polegającą na skracaniu makrocząsteczek, co obserwuje się szczególnie przy niskiej temperaturze walcowania w dłuższym czasie (rys. 3.148).



Rys. 3.147. Schemat procesu walcowania za pomocą dwu walców: *1* i *2* — walce obracające się z prędkością obwodową odpowiednio V_1 i V_2, przy czym $V_1 > V_2$, *3* — rolka tworzywa, *4* — płat tworzywa przywarty do walca, *5* — nóż rozcinający plastyfikat, *6* — wanna do odpadów tworzywa

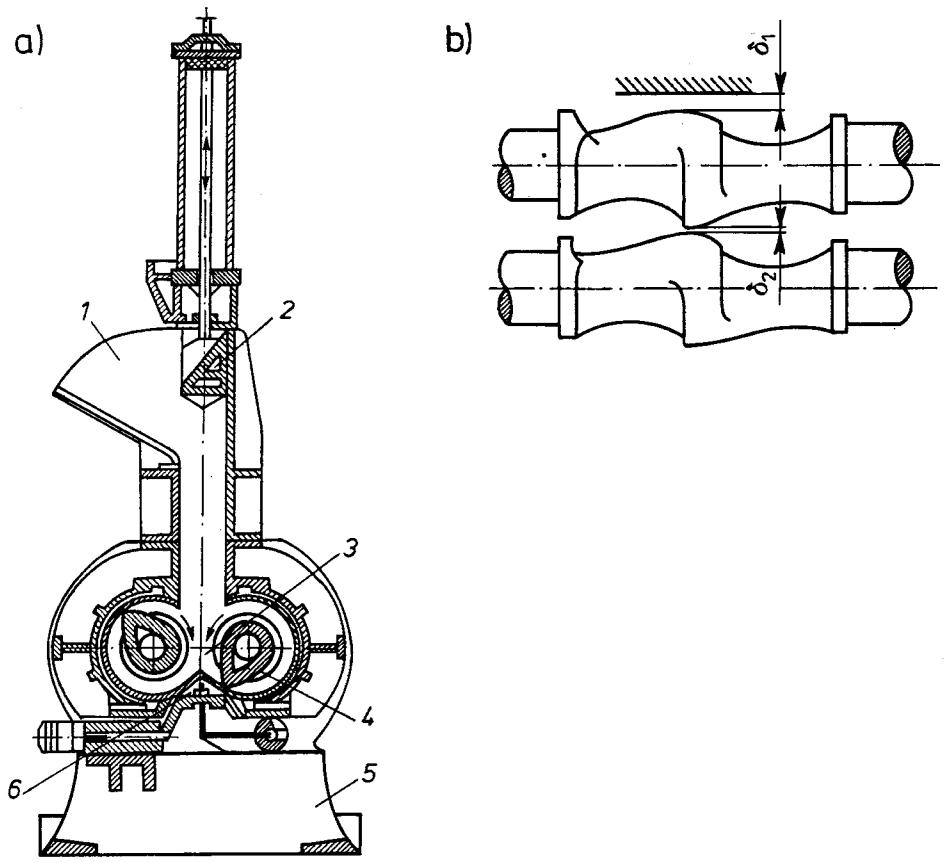


Rys. 3.148. Zależność masy cząsteczkowej M od czasu T i temperatury walcowania PIB [3.98]

W walcowaniu za pomocą jednego walca, współpracującego z elementem oporowym, wykorzystuje się głównie proces rozcierania i jest ono obecnie już rzadko stosowane. W walcowaniu trójwalcowym prędkości poszczególnych walców powiększają się znacznie w kierunku ruchu tworzywa walcowanego, np. ich stosunek może wynosić 1:2:4 lub 1:3:9. Walcowanie to jest także rzadko stosowane.

Ugniatanie

Tworzywa w stanie plastycznym często poddaje się ugniataniu. Polega ono na cyklicznym przepływie tworzywa, znajdującego się pod pewnym ciśnieniem, w obszarze pomiędzy na ogół dwoma krótkimi walcowymi elementami niekołowymi — gniotownikami, oraz w obszarze pomiędzy tymi elementami i powierzchnią cylindryczną. Oba obszary mają zmienną szerokość. Podczas tego rodzaju przepływu występują w tworzywie głównie naprężenia styczne i normalne, powodując nie tylko rozprowadzanie składników, ale również w znacznym stopniu ich ugniatanie i rozcieranie. Na rysunku 3.149 przedstawiono typową ugniatarkę.



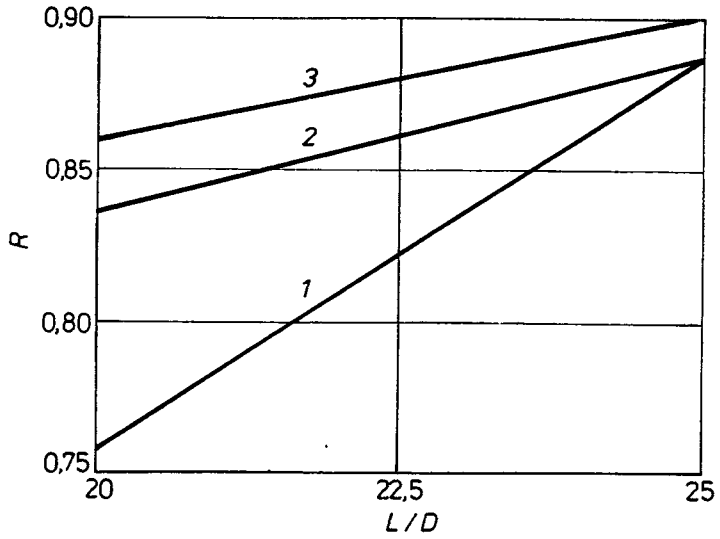
Rys. 3.149. Schemat ugniatarki typu Banbury: a) przekrój wzdłużny, b) gniotowniki; *1* — lej do wprowadzania składników, *2* — tłok zamykający i otwierający komorę roboczą oraz wywołujący ciśnienie, *3* — komora robocza, *4* — gniotowniki, *5* — podstawa ugniatarki, *6* — zawór urządzenia spustowego δ_1 i δ_2 — zmienna szerokości

Mieszanie ślimakowe

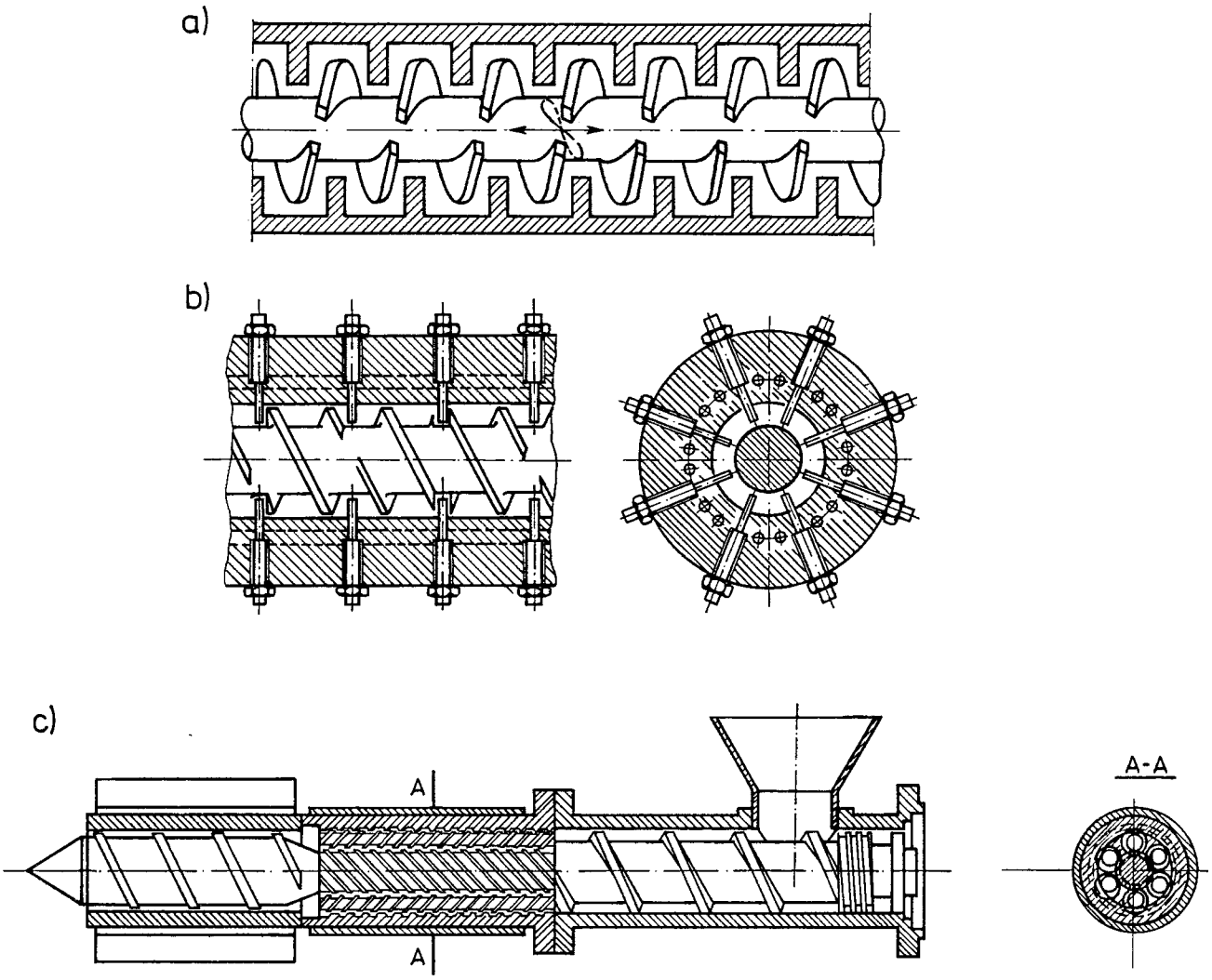
Jakość mieszania ślimakowego określa się efektywnie w sposób zaproponowany przez V. Giegericha [3.59], polegający na jednoczesnym wprowadzaniu do układu uplastyczniającego małej ilości środka barwiącego i tworzywa bezbarwnego oraz ocenie rozkładu częstości koncentracji barwy w otrzymanej wytłoczynie — koncentracja 0% odpowiada tworzywu bezbarwnemu, natomiast koncentracja 100% odpowiada środkowi barwiącemu. Rozkłady te są zbliżone do rozkładu normalnego Gaussa [3.184]. Są też próby powiązania jakości mieszania ze zjawiskami reologicznymi zachodzącymi podczas wytłaczania jednoślimakowego [3.143] i dwuślimakowego [3.46].

W klasycznym układzie uplastyczniającym jednoślimakowym mieszanie jest jedną z jego podstawowych funkcji (rozdz. 1, p. 1.1) i jest powodowane przepływem poprzecznym w kanale ślimaka. Jakość tego mieszania ocenić należy jako niezbyt dużą, mało zależną od warunków procesu uplastyczniania [3.13], a polepszającą się ze wzrostem długości części roboczej ślimaka (rys. 3.150). Jakość mieszania polepsza się wyraźnie poprzez zastosowanie ślimaków z elementami intensywnego ścinania i mieszania, na przykład z takimi jak na rys. 1.8÷1.11.

Konstruowane są także specjalne układy ślimakowe, których głównym celem jest mieszanie. Na rysunku 3.151 pokazano przykładowo niektóre z takich układów. Układ, jak na rys. 3.151a, był już rozpowszechniony w latach pięćdziesiątych [3.73]



Rys. 3.150. Zależność stopnia zmieszania R od stosunku L/D ślimaka klasycznego o średnicy 19 mm w normalnych warunkach wytłaczania z zastosowaniem głowicy szczelinowej: *1* — PE-LD (Lupolen 1810 E), *2* — PE-LD (Politen I 020/GO), *3* — PE-LD (Politen II 003/GO) [3.184]



Rys. 3.151. Układy ślimakowe, których główną funkcją jest mieszanie (przykłady): a) układ typu Ko-Kneter, b) układ z kilkoma rzędami trzpieni nieprzelotowych umieszczonych w cylindrze, c) liniowy układ ślimakowo-planetarny

i nazywany układem typu Ko-Kneter. Ślimak tego układu ma najczęściej dwa usytuowane naprzeciwko siebie wzdłużne wybrania, cylinder zaś — dwa rzędy występów. Ślimak wykonuje jednocześnie ruch obrotowy i ruch postępowo-zwrotny. Przy ruchu postępowym, który jest powolny, występy cylindra wygarniają tworzywo z kanału śrubowego ślimaka, po czym następuje szybki ruch powrotny ślimaka i cykl rozpoczyna się od początku. Układ ten był modernizowany, a do bardziej znanych nowszych jego rozwiązań z drugiej połowy lat osiemdziesiątych należy rozwiązanie firmy Buss AG (Szwajcaria). Jeżeli występy cylindra tworzą więcej rzędów [3.68], to mogą przybierać postać wkręcanych w cylinder trzpieni nieprzelotowych (rys. 3.151b) lub przelotowych. Układ, jak na rys. 3.151c, tworzą szeregowo połączone: układ jednoślimakowy, planetarny i znowu jednoślimakowy.

Znaczny efekt mieszania zapewniają również układy uplastyczniające kaskadowe i planetarne (rys. 1.19 i 1.20).

3.8. Przędzenie

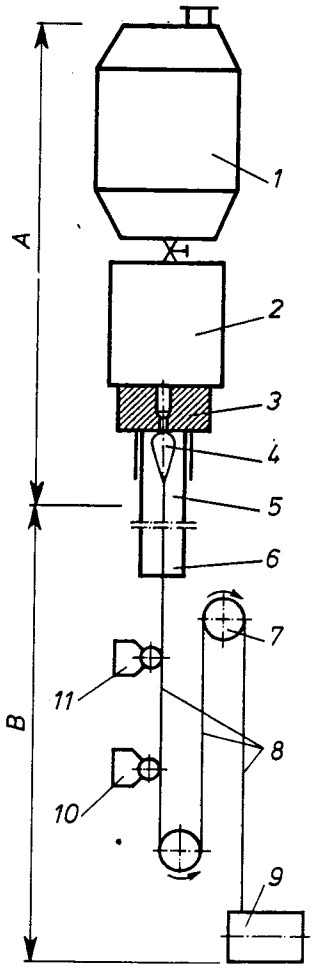
Przędzenie polega na ciągłym przepychaniu przez kanaliki *dyszy przędzalniczej* (przędzącej) włóknotwórczego tworzywa termoplastycznego lub utwardzalnego w stanie ciekłym, wyciągnięciu strumienia, jego zestaleniu bądź utwardzeniu, nałożeniu substancji preparujących oraz zwinięciu włókna na szpuli odbierającej. Przędzalność tworzyw jest bardzo zróżnicowana; do tworzyw o najlepszej przędzalności należą poliamidy, poliestry, głównie politereftalan etylenowy, poliakrylonitryl i tworzywa celulozowe. Proces przędzenia odbywa się na maszynach do przędzenia zwanych *przędzarkami*, w których narzędziem jest głowica przędzalnicza mająca dyszę przędzalniczą.

Przeprowadzanie tworzywa w stan ciekły może odbywać się zarówno poprzez stapianie, jak i poprzez rozpuszczanie w rozpuszczalniku i w związku z tym rozróżnia się przędzenie ze stopu* oraz przędzenie z roztworu. Ze względu na większą wydajność i prostszy proces, większe znaczenie ma przędzenie ze stopu, które zostanie dalej zwięźle scharakteryzowane. Przędzarka do przędzenia ze stopu nosi nazwę *przędzarki stopowej* lub stopoprzędzarki. Literatura na temat przędzenia ze stopu jest bardzo obszerna, a w Polsce na wyróżnienie zasługują prace S. Bulika [3.31 ÷ 3.35].

Schemat przędzenia ze stopu tworzywa włóknotwórczego oraz schemat przędzarki, składającej się z włókniarki i odbieralki, przedstawiono przykładowo na rys. 3.152. Proces ten obejmuje następujące główne etapy: stapianie tworzywa w głowicy przędzalniczej, przepływ stopionego tworzywa przez kanaliki dyszy przędzalniczej (zwanej też filierą), rozszerzenie się strumienia po opuszczeniu kanalika (efekt Barusa), wyciąganie strumienia plastycznego jeszcze włókna, ruch zestalanego włókna do szpuli odbierającej, naniesienie preparacji oraz zwinięcie włókna na szpuli.

---

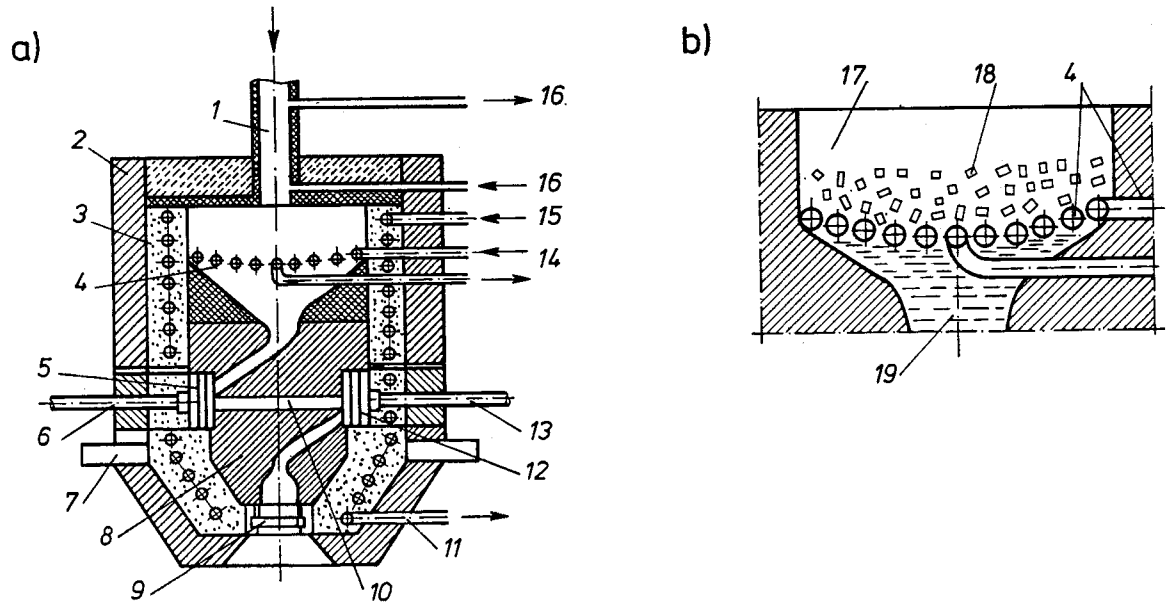
* Pojęcie stopu zostało użyte ze względu na tradycję, jest ono jednak nieścisłe. Stopem bowiem nazywa się od dawna w metaloznawstwie two rzywo metalowe otrzymane przez stopienie i zmieszanie metali lub metali z półmetalami. Przykładem może być stop żelaza z węglem — stal, a także stop miedzi z cynkiem — mosiądz itp.



Rys. 3.152. Schemat przędzenia ze stopu i przędzarki: *A* — włókniarka, *B* — odbieralka, *1* — zbiornik tworzywa rozdrobnionego, *2* — stapiacz i napęd głowicy, *3* — dysza przędzalnicza, *4* — efekt Barusa, *5* — komora nawiewna chłodząca, *6* — komora klimatyzowana, *7* — rolki prowadzące, *8* — włókno, *9* — szpula odbierająca, *10* — nakładanie preparacji, *11* — nawilżanie

Stapianie tworzywa odbywa się w atmosferze gazu obojętnego, na ogół azotu, co zabezpiecza tworzywo przed utlenianiem, w części głowicy zwanej *stapiaczem*. Stapiacze mogą być rusztowe (rys. 3.153), ślimakowo-rusztowe [3.34, 3.35] lub inne. *Stapiacz rusztowy* składa się z misy metalowej o dnie stożkowym i rusztu w kształcie rurki zwiniętej spiralnie, na którym spoczywa rozdrobnione tworzywo poddawane procesowi topnienia. Ruszt jest ogrzewany elektrycznie lub za pomocą cieczy ewentualnie par organicznych (ang. *dowtherm* lub *marlotherm*). Pod stapiaczem znajduje się układ pompek zębatych: podającej i dozującej stopione tworzywo do zestawu przędzalniczego. Wydajność pompek zawiera się w granicach $0{,}6 \div 2500$ cm^3 na jeden obrót i dla zapewnienia określonych właściwości włókien, zwłaszcza ich grubości, nie powinna się wahać ponad $2 \div 3\%$. Ciśnienie za pompką dozującą dochodzi do 100 MPa. Obroty pompki podającej są zwykle nieco większe od obrotów pompki dozującej ($2 \div 3$ obrotów na minutę).

Zestaw przędzalniczy składa się z filtru, płyty perforowanej i dyszy przędzalniczej (filiery). Filtr zabezpiecza przed nawet częściowym zatkaniem kanalików dyszy. Filtry mogą być siatkowo-piaskowe, zbudowane z siatki ze stali kwasoodpornej z umieszczonymi nad nimi kilkoma warstwami materiału ziarnistego, np. krzemionki, korundu itp., lub ceramiczne, czyli ze spiekanych granulek ceramiczno-metalowych. Zadaniem płyty perforowanej jest równomierne rozprowadzenie tworzywa stopionego do poszczególnych kanalików dyszy. Dysze przędzalnicze są wykonane ze stali stopowej w kształcie krążków płaskich, często kołowych, o grubości od kilku do kilkunastu



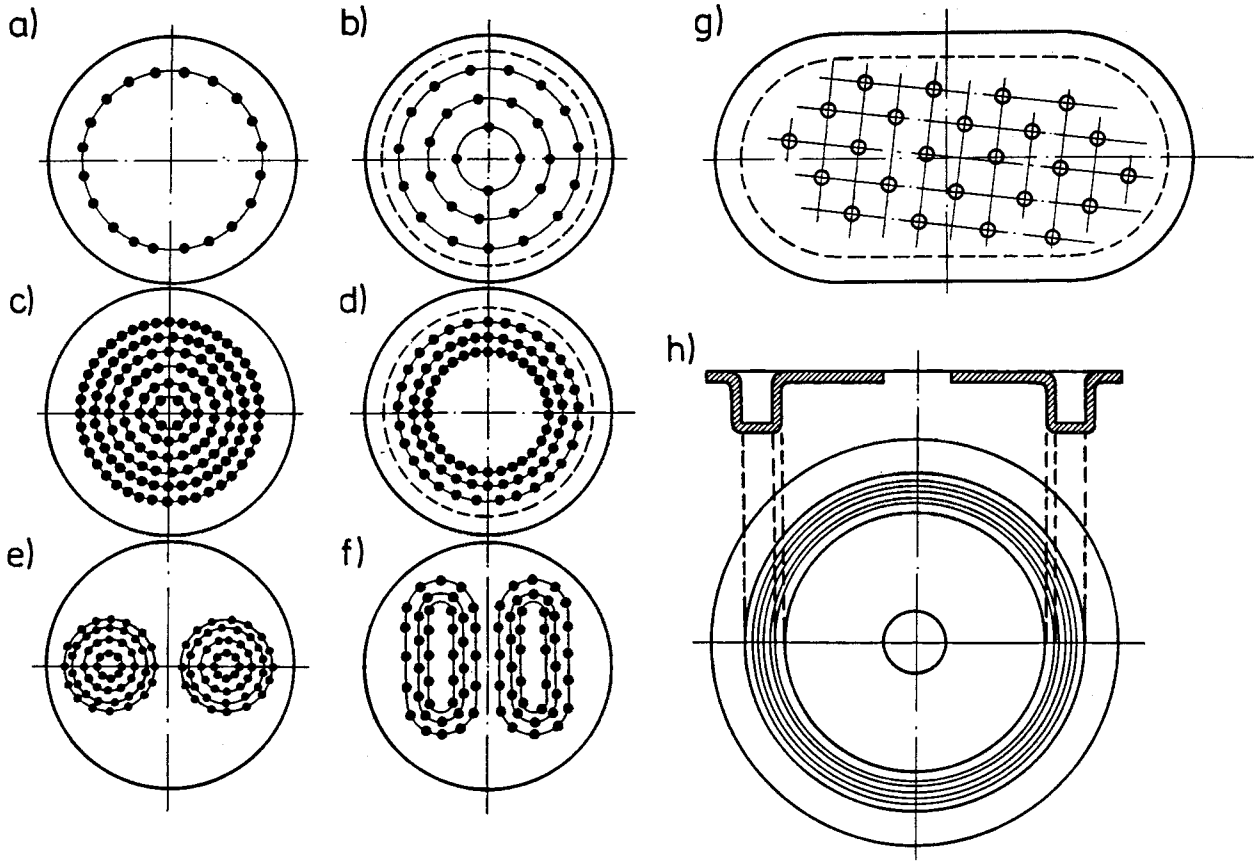
Rys. 3.153. Głowica przędzalnicza ze stapiaczem rusztowym: a) przekrój, b) fragment ilustrujący działanie stapiacza; *1* — doprowadzanie tworzywa, *2* — izolacja cieplna, *3* — ściana grzejna (wężownica zatopiona w metalu), *4* — ruszt, *5* — pompka podająca, *6* — wałek napędu pompki podającej, *7* — łapy mocujące, *8* — korpus, *9* — zestaw przędzalniczy, *10* — kanał międzypompkowy, *11* — odprowadzenie czynnika grzejnego od ścianki, *12* — pompka dozująca, *13* — wałek napędu pompki dozującej, *14* — doprowadzenie i odprowadzenie czynnika grzejnego do rusztu, *15* — doprowadzenie czynnika grzejnego do ścianki, *16* — doprowadzenie i odprowadzenie gazu obojętnego, *17* — gaz obojętny, *18* — tworzywo rozdrobnione, *19* — tworzywo stopione

milimetrów, głównie w zależności od ciśnienia tworzywa panującego przed dyszą. Poza wyjątkowymi przypadkami są to dysze wielokanalikowe o rozmaitym rozmieszczeniu kanalików (rys. 3.154). Kanaliki mają zazwyczaj przekrój poprzeczny kołowy i wówczas składają się z dwu odcinków (rys. 3.155a): dłuższego o średnicy większej D i krótszego o średnicy mniejszej d. Stosunek długości h odcinka krótszego do jego średnicy d należy do ważnych wielkości charakteryzujących kanalik; na ogół wynosi on około $1 \div 3$, np. $h/d = 1$ dla PA 6, natomiast $h/d = 2 \div 3$ dla PP. Kanaliki niekołowe mają bardzo różne kształty przekroju poprzecznego (rys. 3.156) i budowę bardziej złożoną (rys. 3.155b).

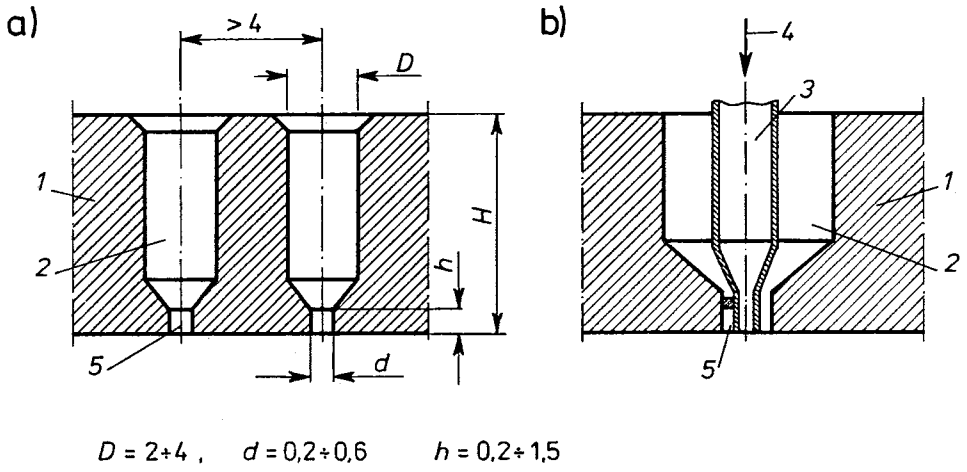
Przepływ tworzywa przez kanaliki dyszy przędzalniczej odbywa się z dużą prędkością i z tego względu oraz z uwagi na małą, w stosunku do średnicy, długość kanalika, zwłaszcza jego krótszego odcinka, czas przepływu jest bardzo krótki, nie wystarczający do uformowania się określonego rozkładu prędkości. Prędkość ścinania podczas przepływu jest bardzo duża $10^3 \div 3 \cdot 10^4 s^{-1}$ i większa. W rozważaniach nad mechanizmem przepływu tworzywa podstawą jest zasada ciągłości przepływu; w każdym polu przekroju poprzecznego A kanalika, przez które przepływa z prędkością V tworzywo o gęstości ρ w danej temperaturze, zachodzi równanie [3.211]

$$A\, V\, \rho = \text{const} \tag{3.113}$$

Po opuszczeniu kanalików, na odcinku strużki o długości od kilku do kilkudziesięciu milimetrów, występuje w niej efekt Barusa. Podłużny gradient prędkości — prędkość rozciągania, przyjmuje wartości ujemne, następuje dezorientacja częś-

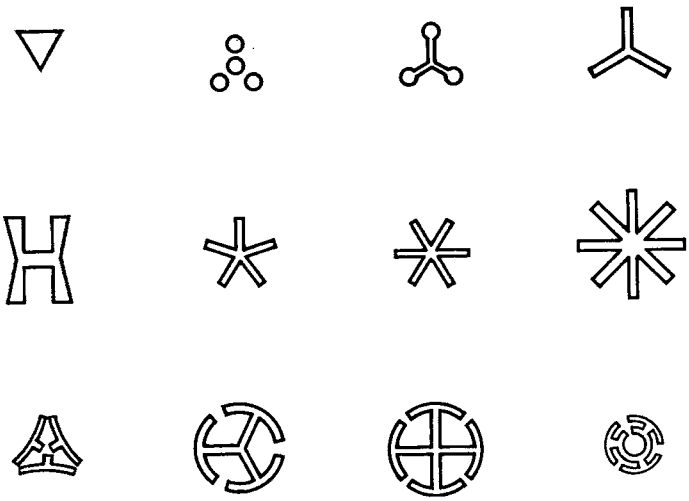


Rys. 3.154. Rozmieszczenie kanalików w dyszy przędzalniczej: a) na jednym okręgu, b) na kilku okręgach, c) na całej powierzchni, d) na powierzchni pierścieniowej płaskiej, e) na dwóch powierzchniach kołowych, f) na dwóch powierzchniach owalnych, g) w kilku szeregach, h) na powierzchni pierścieniowej zagłębionej

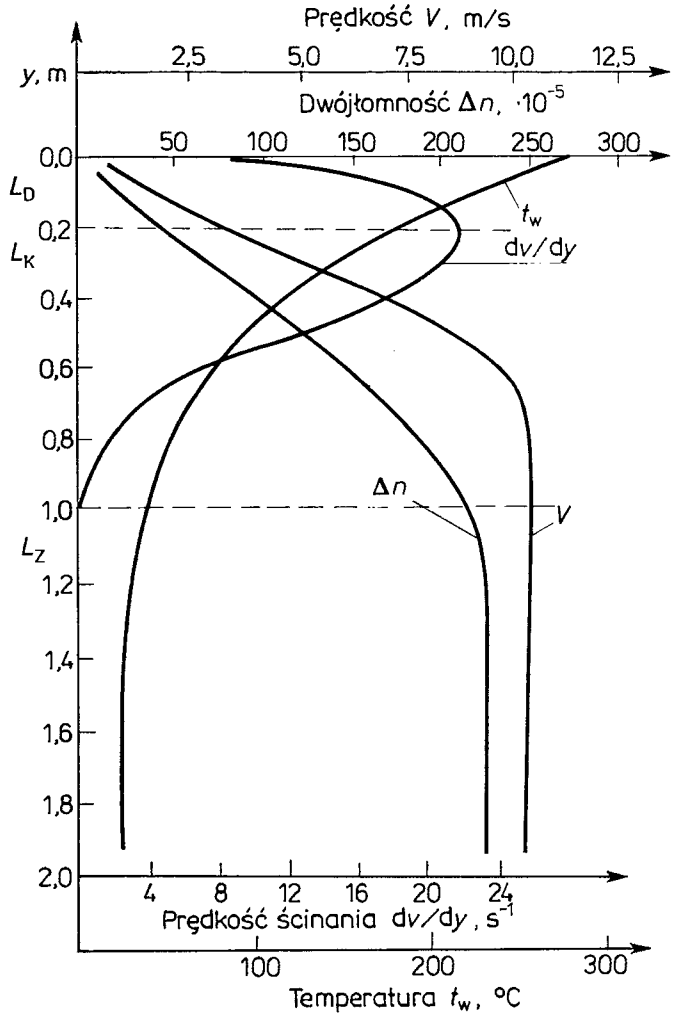


Rys. 3.155. Fragment przekroju wzdłużnego dyszy przędzalniczej z kanalikami kołowymi (a) i niekołowymi (b): *1* — materiał dyszy, *2* — kanalik o średnicy większej, *3* — rurka kapilarna, *4* — gaz obojętny, *5* — kanalik o średnicy mniejszej

ciowo uporządkowanych w czasie przepływu przez kanalik makrocząsteczek. Rozszerzenie strużki powiększa się wraz ze wzrostem prędkości przepływu tworzywa i jego lepkości, a maleje ze wzrostem średnicy odcinka krótszego kanalika i jego długości. Efekt Barusa jest oceniany jako niepożądany, umożliwia bowiem powstanie ewentualnych zgrubień włókna, zwłaszcza przy fluktuacji lepkości.



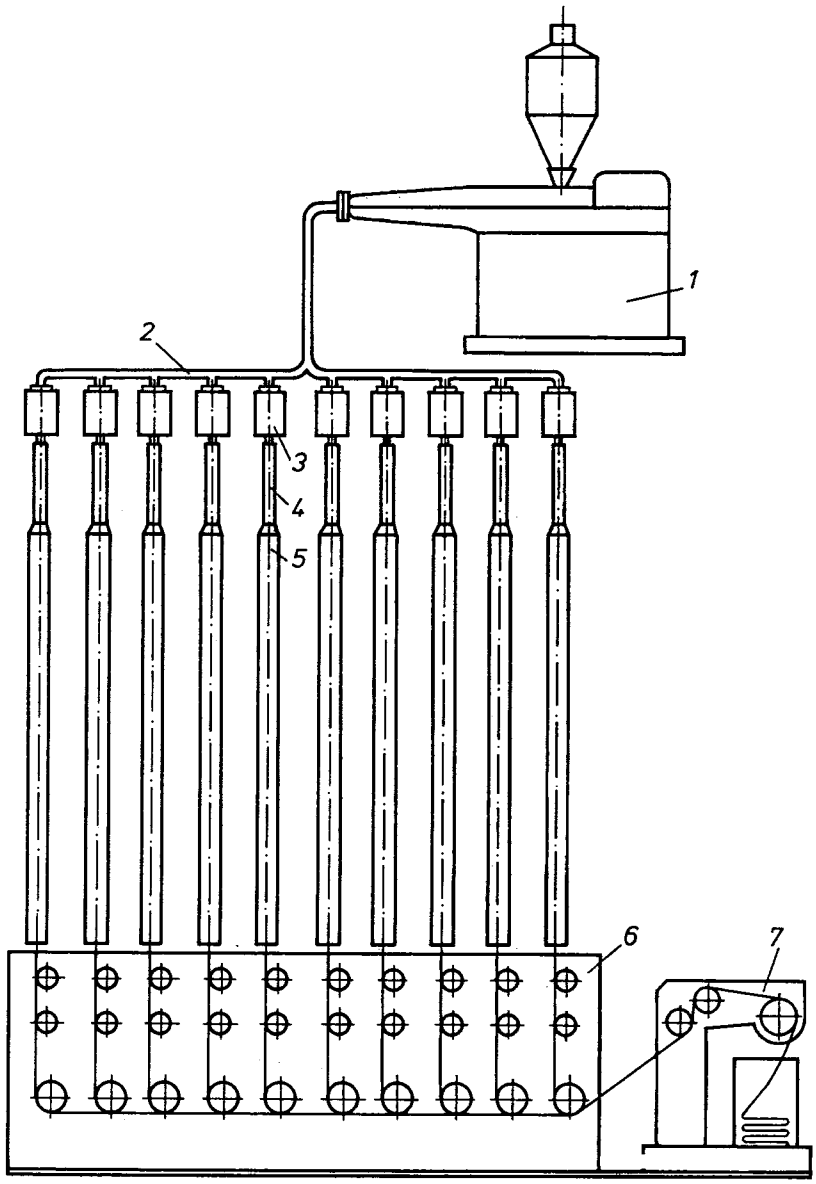
Rys. 3.156. Kształty przekroju poprzecznego kanalików niekołowych do otrzymywania włókien profilowanych (przykłady)



Rys. 3.157. Zależność niektórych wielkości charakteryzujących proces formowania włókna z PA 6 od odległości y liczonej do końca kanalika dyszy: V — prędkość liniowa, Δn — dwójłomność optyczna, dv/dy — prędkość ścinania, t_w — temperatura tworzywa [3.32]

Na dłuższym odcinku strużki liczącym na ogół do 1 m, pod wpływem siły ciężkości oraz siły pochodzącej od układu rolek i szpuli odbierającej, następuje zmniejszenie pola przekroju strużki, narastanie jej prędkości oraz obniżanie temperatury z jedno-

czesnym wzrostem lepkości, gęstości, naprężenia rozciągającego, dwójłomności optycznej oraz orientacji makrocząsteczkowej (rys. 3.157). Prędkość ścinania dv/dy najpierw rośnie i po osiągnięciu wartości największej maleje do zera. Miejsce na drodze



Rys. 3.158. Schemat procesu przędzenia włókien z jednym stapiaczem i wieloma zestawami przędzalniczymi: *1* — stapiacz (wytłaczarka ślimakowa), *2* — kolektor rozdzielczy, *3* — zestaw przędzalniczy, *4* — komora chłodząca nawiewna, *5* — komora klimatyzowana, *6* — odbieralka, *7* — układarka [3.21]

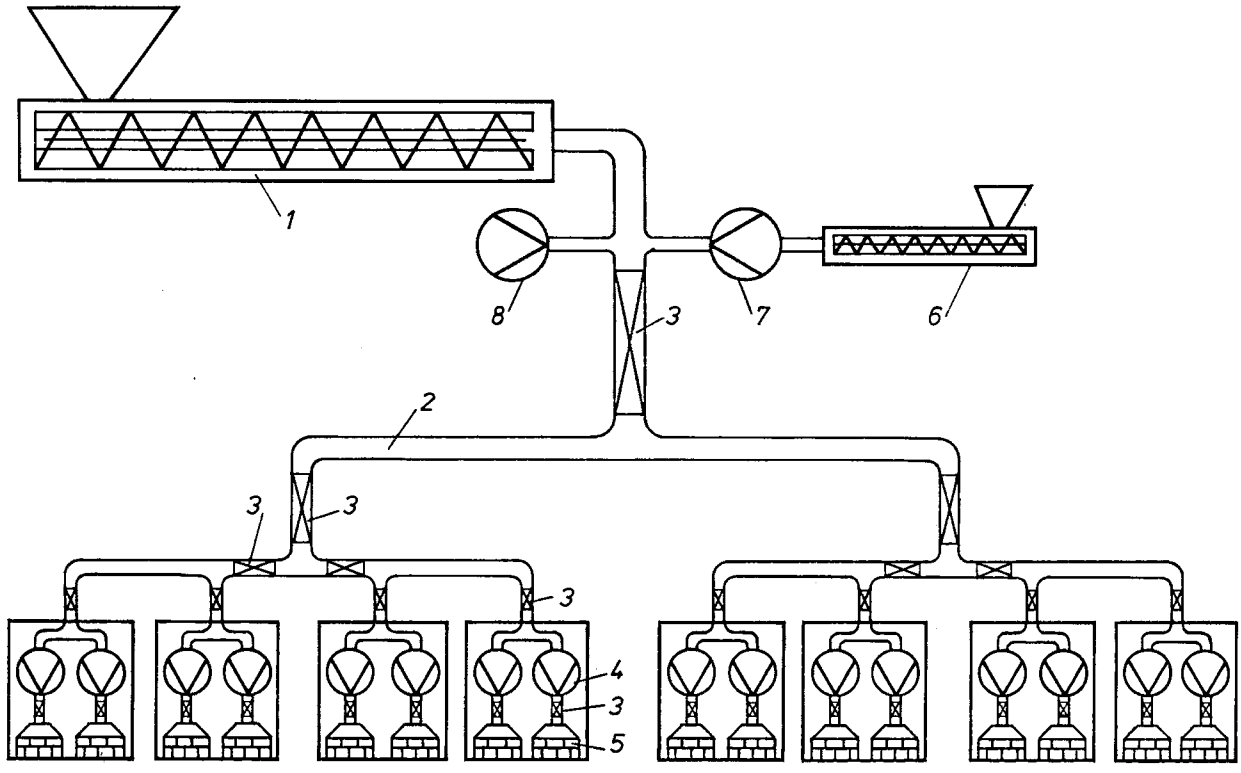
strużki, w którym dv/dy osiąga maksimum, jest umownie tym, od którego rozpoczyna się proces zestalania, natomiast miejsce, gdzie $dv/dy = 0$, charakteryzuje zestalenie strużki i jej przejście we włókno. Omawiane zjawiska zachodzą w komorze chłodzącej (rys. 3.152), wyposażonej w urządzenie nawiewne [3.32]. Czas trwania zjawisk wynosi ułamek sekundy, a wydłużenie jest kilkudziesięciokrotne. Miarą wydłużenia jest *współczynnik wyciągu Z*, definiowany jako stosunek prędkości V_E odbierania włókna do prędkości V_0 wypływu tworzywa z kanalika, przy włóknach niekołowych w przybliżeniu równy stosunkowi kwadratów średnicy kanalika d i włókna D_w odbieranego przez szpulę

$$Z = \frac{V_E}{V_0} \approx \frac{d^2}{D_w^2} \tag{3.114}$$

Współczynnik ten ma wartości rzędu od kilkunastu do kilkudziesięciu. Zestalone włókno na drodze aż do szpuli odbierającej nie zmienia swoich wymiarów, zachodzą tylko w nim zmiany struktury związane z dalszym ochładzaniem i stabilizowaniem. Zasadnicza część tych zmian odbywa się w komorze klimatyzowanej (rys. 3.152). Poniżej tej komory włókno może być zwilżane wodą w celu polepszenia stabilizacji, a następnie nakłada się na nie preparację, niezbędną w dalszej obróbce włókienniczej i późniejszych zastosowaniach. Włókno takie jest zwijane na szpuli odbierającej i poddawane obróbce włókienniczej za pomocą innych maszyn; przede wszystkim poddaje się je wydłużaniu.

W celu zwiększenia wydajności proces przędzenia może być prowadzony w ten sposób, że stapianie tworzywa zachodzi w jednym stapiaczu i jest ono rozprowadzane kolektorami rozdzielczymi (często ogrzewanymi) do kilku zestawów przędzalniczych. Takie rozwiązanie występuje szczególnie, gdy funkcję stapiacza spełnia wytłaczarka ślimakowa (rys. 3.158).

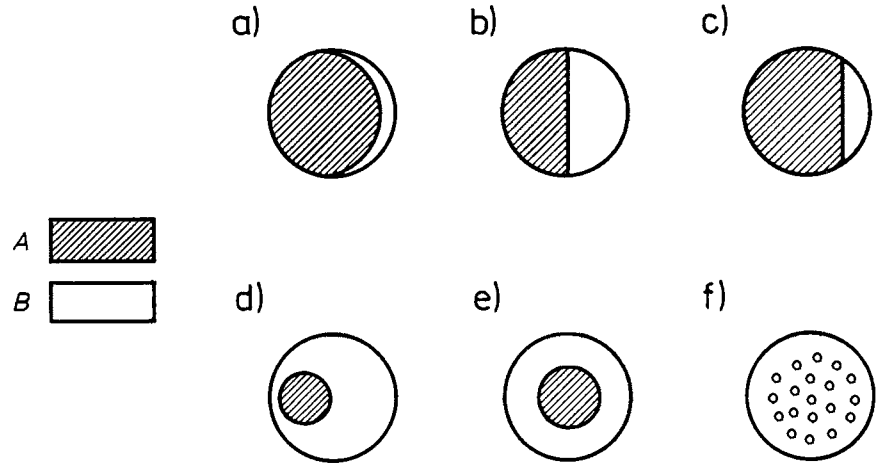
Niekiedy zachodzi potrzeba wprowadzania do włókien domieszek. Domieszkowanie włókien można rozwiązać stosując dwie wytłaczarki ślimakowe — zasadniczą do tworzyw i dodatkową do domieszki, oraz mieszarki umieszczone w kolektorach rozdzielczych (rys. 3.159).



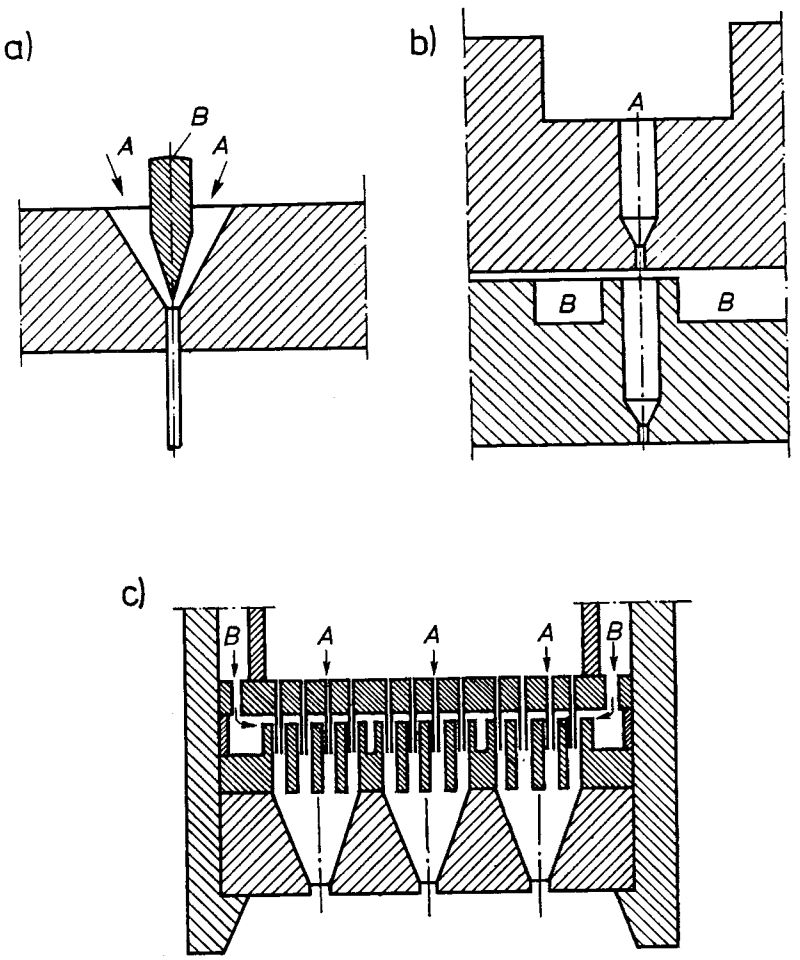
Rys. 3.159. Schemat fragmentu procesu przędzenia z domieszkowaniem: *1* — wytłaczarka do tworzywa, *2* — kolektor rozdzielczy, *3* — mieszarki, *4* — pompki zębate dozujące, *5* — filtry, *6* — wytłaczarka do domieszki, *7* — pompka zębata domieszkująca, *8* — pompka zębata do podawania innych składników [3.33]

Przędzenie włókien wielotworzywowych wymaga tylu stapiaczy, z ilu tworzyw włókno się składa, ale tylko jednego zestawu przędzalniczego. Włókna wielo-

tworzywowe mogą być sprzężone bocznie lub rdzeniowo (rys. 3.160). Zestawy przędzalnicze do włókien wielotworzywowych są bardzo złożone. Na rysunku 3.161 przedstawiono schematycznie niektóre rozwiązania dyszy takich zestawów.



Rys. 3.160. Przekroje poprzeczne niektórych włókien dwutworzywowych: a), b) oraz c) włókna sprzężone bocznie, d), e) oraz f) włókna sprzężone rdzeniowo, *A* i *B* — różne tworzywa



Rys. 3.161. Schematy niektórych rozwiązań dysz zestawów przędzalniczych do przędzenia włókien wielotworzywowych: a) dysza do włókien sprzężonych bocznie, b) dysza do włókien sprzężonych rdzeniowo, c) dysza do włókien wielordzeniowych, *A* i *B* — różne tworzywa [3.33]

Literatura

3.1. Aida F.: Investigation of ultra-high speed extruder, based on entirely new design concept. *Japan Plastics* 3/1975.
3.2. Anders D. i inni: Filtrieren von Kunststoffschmelzen. *Kunststoffe* 2/1982.
3.3. Antoniewicz B.: Wytłaczanie izolacji z polietylenu piankowego. *Przegląd Mechaniczny* 17/1982.
3.4. Ardichvili G.: An Attempt at a Rational Determination of the Cambering of Calander Rolls. *Kautschuk* **14**, 23 (1938).
3.5. Axentowicz M.: „Tworzywa sztuczne w budowie wykrojników". WNT, Warszawa 1965.
3.6. Axentowicz M., Kowalski B.: Żywice epoksydowe w budowie narzędzi i przyrządów. *Mechanik* 1, 2 i 3/1977.
3.7. Baranówna J., Płochocki A.: Ocena możliwości obliczania układu ślimak–ustnik wytłaczarki. *Polimery* 4/1969.
3.8. Басов Н.И., Казанков Ю.В.: „Литевое формовение полимеров". Изд. Химия, Москва 1984.
3.9. Басов Н.И., Казанков Ю.В.: Любартович В.А.: „Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки полимерных материалов". Изд. Химия, Москва 1986.
3.10. Beiss K.: Faserspritzen — Flexibilität und Formenreichtum beim Verstärken. *Kunststoffe* 9/1985.
3.11. Benjamin W.P.: „Oprzyrządowanie z tworzyw sztucznych". WNT, Warszawa 1978.
3.12. Biesenberger J.A., Kessidis G.: Devolatilization of polymer melts in single–screw extruders. *Polymer Engineering and Science* 13/1982.
3.13. Błasiński H., Kochański B., Rzyski E.: Ocena jakości mieszania w przetwórstwie polimerów. *Inżynieria i Aparatura chemiczna* 6/1977.
3.14. Błaszkowski K., Waszkiewicz S., Zawadzki K.: Żywice epoksydowe jako tworzywo konstrukcyjne. *Przegląd Mechaniczny* 7/1966.
3.15. BN-88/2364-16.
3.16. Bojarska U.: Wpływ stopnia rozdrobnienia politetrafluoroetylenu suspensyjnego (Tarflenu) na właściwości wyrobów. *Polimery* 3/1990.
3.17. Borkowski J., Rumiński A.: Produkcja tworzyw wzmocnionych metodą nawijania włókien. *Polimery* 5/1967.
3.18. Borowski R.: Linie kalandrujące do tworzyw sztucznych i najnowsze tendencje w ich budowie. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 6/1973.
3.19. Borowski R.: Możliwości optymalnego sterowania linią kalandrującą do tworzyw sztucznych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 6/1974.
3.20. Borowski R.: Optymalizacja procesu kalandrowania. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2/1977.
3.21. Boryniec A., Skwarski T.: „Technologia włókien sztucznych". WPLiS, Warszawa 1969.
3.22. Брагинский В.А.: „Точное литие изделий из пластмасс". Изд. Химия, Ленинградское отделение 1977.
3.23. Brojer Z., Hertz Z., Penczek P.: „Żywice epoksydowe". WNT, Warszawa 1982.
3.24. Bross J.: „Mieszanie materiałów ziarnistych". PWN, Warszawa 1987.
3.25. Brzoskowski R.: Zagadnienia płynięcia tworzywa w układzie wlewowym i gnieździe formy. *Mechanik* 8/1983.
3.26. Brzoskowski R., Bugajczyk J.: Wpływ parametrów wtrysku na wartość ciśnienia wypełnienia formy. *Polimery* 4/1978.
3.27. Brzoskowski R., Szydłowski W.: Dźwigniowo-hydrauliczny układ zamykania formy wtryskarki. *Polimery* 5/1976.
3.28. Brzoskowski R., Szydłowski W.: Model matematyczny przepływu stopionych polimerów przez kanał o przekroju kołowym formy wtryskowej. *Polimery* 3/1981.
3.29. Brzoskowski R., Szydłowski W., Dobrowolski K.: Koncepcja diagramów do obliczania strat ciśnienia w kanałach o przekroju kołowym form wtryskowych. *Polimery* 4/1981.
3.30. Bucksch W., Briefs H.: „Formy do prasowania tworzyw termoutwardzalnych". PWT, Warszawa 1958.

3.31. Bulik S.: Kierunki zmian w budowie przędzarek stopowych. *Polimery* 8 i 9/1980.
3.32. Bulik S.: Urządzenia nawiewne w maszynach służących do formowania włókien chemicznych techniką stopową. *Polimery* 7/1985, 9/1986, 1 i 6/1987.
3.33. Bulik S.: Wielozadaniowe maszyny do wytwarzania jedwabiu syntetycznego. *Polimery* 2 i 8/1989.
3.34. Bulik S.: Zasilanie stopoprzędzarek i stapianie polimeru. *Polimery* 2/1982.
3.35. Bulik S., Mertl J.: Badania nad optymalizacją stapiaczy ślimakowo-rusztowych. *Polimery* 10–11/1976.
3.36. Bursa J.: „Rury metalowe z powłokami z tworzyw sztucznych". WNT, Warszawa 1973.
3.37. Byczkowski R., Dymaczewski J., Królak K.: Otrzymywanie profili z polichlorku winylu metodą współwytłaczania. *Polimery* 10/1981.
3.38. Byczkowski R., Leśniczak T.: Narzędzia do kształtowania profili z polichlorku winylu. *Polimery* 5/1988.
3.39. Charachaś O.G. i inni: Tłoczywa epoksydowe dla mikroelektroniki. *Polimery* 5/1989.
3.40. Chwalisz L.: Przełączanie ciśnienia wtrysku na ciśnienie docisku przy wtryskiwaniu tworzyw termoplastycznych. *Mechanik* 4/1984.
3.41. Closed-mold processing is becoming more interesting for RP. *Modern Plastics International* 2/1981.
3.42. „Co i jak produkować z tworzyw sztucznych" (praca zbiorowa). PWT, Warszawa 1959.
3.43. Continuous BMC doser cuts materials handling costs. *Modern Plastics International* 3/1989.
3.44. Cybulski A. i inni: Mieszanie składników żywicy poliestrowej za pomocą mieszalnika statycznego. *Polimery* 10/1977.
3.45. Dahlig W., Krzemiński J.: Z badań nad przetwórstwem polietylenu. *Polimery* 3/1971.
3.46. Dey S.K. i inni: Mischungskriterium für Zweischneckenextruder. *Kunststoffe* 5/1986.
3.47. Dębski W., Królikowski W., Stranc W.: Przetwórstwo wtryskowe tłoczyw poliestrowych wzmacnianych włóknem szklanym. *Przegląd Mechaniczny* 11/1980.
3.48. Dębski W., Przyłęcka M.: Wpływ parametrów technologicznych przetwórstwa na strukturę i własności mechaniczne kształtek z polipropylenu J-400. *Polimery* 7/1976.
3.49. Diakun J.: „Analiza procesów strefy zasilania układów uplastyczniających wytłaczarek ślimakowych". Wyd. WSI w Koszalinie, Koszalin 196-987 oraz „Podstawy uaktywnienia strefy zasilania w konstrukcji wytłaczarki ślimakowej". Wyd. WSI w Koszalinie, Koszalin 1991.
3.50. Dobraczyński A., Pochwalski J.: „Technologia przetwórstwa tłoczyw termoutwardzalnych". PWT, Warszawa 1954 (część I), 1956 (część II).
3.51. Drążkiewicz T., Raczyńska J.: „Powłoki ze zmiękczonego PCW na przedmiotach metalowych". WNT, Warszawa 1973.
3.52. Du Pont Information Service 1986.
3.53. Dunbar S.G.: Glass reinforcements for producing RTM parts. *Plastics Engineering* 9/1984.
3.54. „Duroplaste — Kunststoff Handbuch" (praca zbiorowa pod red. W. Woebckena). Carl Hanser Verlag, München – Wien 1988.
3.55. Formowanie rotacyjne. *Mechanik* 9/1989.
3.56. Frenkler D., Zawistowski H.: Interpretacja podstawowych wielkości charakterystycznych wtryskarki. *Polimery* 4/1979.
3.57. Furmaniak M., Urban J.: Niektóre zagadnienia technologiczno-materiałowe przetwórstwa żywic epoksydowych w przemyśle elektrotechnicznym. *Polimery* 6–7/1980.
3.58. Gaskell R.E.: The Calandering of Plastic Materials. *J. Appl. Mechanics* **11**, 334 (1950).
3.59. Giegerich V.: Messung der Mischgüte von Extrudaten. *Plastverarbeiter* 12/1972.
3.60. Glanvill A.B.: „The Plastics Engineer's Data Book". The Machinery Publishing Co., London 1971.
3.61. Gneuss D.: Aus der Praxis geborene Problemlösung. *Plastverarbeiter* 5/1986.
3.62. Godlewska C.: Tendencje w budowie urządzeń do przetwórstwa tłoczyw termoutwardzalnych. *Mechanik* 11/1977.
3.63. Грегорева Т.А., Куликов Ю.А. Андреевская Л.В.: Исследования в области получения пенотермопластов екструзионными методами. *Пластические Массы* 3/1986.
3.64. Grozik E.: Techniczne warunki wykonawstwa cylindrycznych bębnów laminatowych. „Tworzywa sztuczne w budowie maszyn". Politechnika Krakowska, Kraków 1982.
3.65. „Guma. Poradnik inżyniera i technika" (praca zbiorowa). WNT, Warszawa 1981.

3.66. Han C.D.: „Rheology in Polymer Processing". Academic Press, New York–San Francisco–London 1976.
3.67. „Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik, I Grundlagen und II Extrusionsanlagen" (praca zbiorowa pod red. F. Hensena, W. Knappe, H. Potente). Carl Hanser Verlag, München–Wien 1986.
3.68. Harms E.G.: Der Stiftextruder in der Kautschuk–Extrusion. *Kunststoffe* 1/1984.
3.69. Hartung M.: Multicomponent Injection Molding: New Technology Boosts Versatility. *Plastics Technology* 9/1979.
3.70. Hawrylecka U.: Próba ustalenia korelacji pomiędzy warunkami wtryskiwania polistyrenu a wybranymi kryteriami jakości wyprasek. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1990.
3.71. Helmy H.: Grooved intensively cooled extruders for tough-to-process polyolefins. *Plastics Engineering* 8/1983.
3.72. Hensen F., Hessenbruch R.: Proizvodnja koekstrudiranog filma. „Ekstrudiranje polimera", Zagreb 1984.
3.73. Irzyk M.: „Nowoczesne metody przetwórstwa tworzyw sztucznych". PWN, Warszawa 1961.
3.74. Jacewicz Z.: Wagowa metoda kontroli kształtek wtryskowych z termoplastów. „Problemy konstrukcyjno-technologiczne stosowania tworzyw sztucznych w przemyśle". Wyd. SIMP Oddział Wojewódzki, Częstochowa 1979.
3.75. Jodłowski J., Kaszewski B., Sulima T.: Wpływ parametrów prasowania na własności wyprasek elektroizolacyjnych z tłoczyw termoutwardzalnych M+C i Fn+D. *Polimery* 8/1965.
3.76. Józefoski J., Gruszka M.: Wpływ rodzaju i zawartości środków sieciujących oraz spieniających na gestość pozorną spienionego polietylenu usieciowanego. *Polimery* 4/1988.
3.78. Калинцев В.А., Макаров М.С.: „Намотные стеклопластики''. Изд. Химия, Москва 1986.
3.79. Kiełbiński J.: Metodyka obliczeń przekładni rozdzielczej do wytłaczarek dwuślimakowych. *Polimery* 7–8/1988.
3.80. Kleine-Albers A., Goller H., Sonntag R.: Herstellung von Kunststoff-Formteilen im Fliessgussverfahren. *Kunststoffe* 2 i 3/1962.
3.81. Klenk K.P.: Möglichkeiten für Durchsatzsteigerung bei Doppelschneckenextrudern. 5 Leobender Kunstroffkolloquium Doppelscchneckenextruder, Leoben 1978.
3.82. Komsta M., Połeć K., Smorawiński A.: Kryterium strukturalne oceny prawidłowości wtrysku kształtek precyzyjnych z poliacetali. *Polimery* 6/1975.
3.83. Kopsch H., Schuller R., Reitmeier R.: Neuere Entwicklungen im Bau und Betrib von Folienkalandern. *Kunststoffe* 1, 2 i 3/1971.
3.84. Kowalski S., Zimniak J.: Perspektywy techniki rotacyjnego formowania tworzyw sztucznych. „Rozwój teorii i techniki przetwórstwa, obróbki oraz stosowania tworzyw sztucznych". WSI–NOT, Bydgoszcz 1973.
3.85. Kozłowski J., Wilczopolski M., Wituszyński K.: „Konstrukcje okrętowe z kompozytów polimerowych". Wydawnictwo Morskie, Gdańsk 1982.
3.86. Kozue T.: Incjection Molding. Japan Plastics Industry Annual 29th edition, 1986.
3.87. Красовский В.Н., Воскресеньский А.М.: „Сборник примеров и задач по технологии переработки полимеров". Изд. Высшейшая Школа, Минск 1975.
3.88. Krämer A.: Extrudieren von Profilen aus schaumbaren Thermoplasten. *Kunststoffe* 7/1974.
3.89. Królikowski W.: Kierunki rozwoju tworzyw wzmocnionych. *Polimery* 9/1989.
3.90. Królikowski W.: Niektóre problemy formowania poliestrowych tworzyw wzmocnionych w formach zamkniętych pod ciśnieniem. „Kierunki modyfikacji technicznych tworzyw sztucznych i ich przetwórstwo". OBR Proplast w Poznaniu, Rydzyna 1986.
3.91. Królikowski W., Kłosowska-Wołkowicz Z., Penczek P.: „Żywice i laminaty poliestrowe". WNT, Warszawa 1986.
3.92. Księżopolski A.: Metoda odlewania żywic epoksydowych. „Tworzywa utwardzalne". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1989.
3.93. Kujawski M.: Wpływ tarcia na wzrost oporu w mechaniźmie kolanowym wtryskarki. Prace Instytutu Technologii Budowy Maszyn Politechniki Poznańskiej, Poznań 1981.

3.94. Kupiec S., Bojarska U.: Wytłaczanie politetrafluoroetylenu. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988.
3.95. Lechowski A.: Wpływ środka smarującego na makrostrukturę wyprasek z poliamidu 6 wzmocnionego włóknami szklanymi. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988.
3.96. Леонов А.И., Басов Н.И., Казанков Ю.В.: „Основы переработки реактопластов и резин методом лития под давлением''. Изд. Химия, Москва 1977.
3.97. Lewin A.N., Biezchodarnyj N.F.: „Urządzenia produkcyjne zakładów przetwórstwa tworzyw sztucznych", PWN, Warszawa 1956.
3.98. Łączyński B.: „Metody przetwórstwa tworzyw sztucznych". WNT, Warszawa 1973.
3.99. Лукач Ю.Е., Рябинин Д.Д., Метлов Б.Н.: „Валковые машины для переработки пластмасс и резиновых смесей''. Изд. Машиностроение, Москва 1967.
3.100. Mahn H. i inni: Kalandertechnik. *Kunststoffe* 9/1985.
3.101. Mapleston P.: Composite tooling materials process more easily, perform better in use. *Modern Plastics International* 3/1990.
3.102. Marquardt K.D.: Kalandrieren von PVC-Folien. *Kunststoffe* 9/1985.
3.103. Mazurkiewicz R., Misterek B.: Własności mechaniczne poliamidu 6 spienianego w czasie wtrysku. *Polimery* 5/1977.
3.104. McKelvey J.M.: „Polymer Processing". Wiley and Sons, Inc., New York–London 1962.
3.105. McKelvey J.M.: Theory of Adiabatic Extruder Operation. Paper Presented of September 7, 1953 at the Chicago ACS meeting.
3.106. McKelvey J.M., Bernhardt E.C.: Adiabatic extrusion of polyethylene. *SPE Journal* 3/1954.
3.107. Menges G., Gesenhues N., Schwenzer C.: Bei der Auslegung von Profilwerkzeugen wird die Strangaufweitung berechenbar. *Kunststoffe* 1/1985.
3.108. Menges G., Thienel P.: Eine Messvorrichtung zur Aufname von *p-V-T*–Diagrammen bei praktischen Abkühlegeschwindigkeiten. *Kunststoffe* 10/1975.
3.109. Menges G., Wübken G., Čatić I.: Wärmehaushalt, Temperaturverteilung und thermische Auslegung von Spritzgiesswerkzeugen. *Plastverarbeiter* 1, 2 i 3/1974.
3.110. Michaeli W. i inni: Das RTM — Verfahren — Technologie und Adwendungsgebiete. *Kunststoffe* 7/1989.
3.111. Michalski K.: Kalandrowanie. *Mechanik* 3/1982.
3.112. Michniuk J.: Właściwości tłoczyw epoksydowych stosowanych do hermetyzacji przetłocznej przyrządów półprzewodnikowych. „Tworzywa utwardzalne". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1989.
3.113. Mikucki S.: Zastosowanie tworzyw sztucznych w budowie przyrządów obróbkowych. *Mechanik* 4/1961.
3.114. Misterek B.: Międzynarodowa wystawa tworzyw sztucznych „Plast 88". *Polimery* 11/1988.
3.115. Misterek B.: Nowoczesne maszyny przetwórcze w przemyśle tworzyw sztucznych. *Polimery* 1/1969.
3.116. Misterek B.: Termoplasty spieniane w czasie wtrysku. *Mechanik* 1/1978.
3.117. Misterek B.: Zarys zasad i techniki wytłaczania porowatych termoplastów. „Proces wytłaczania tworzyw sztucznych". PAN–PŚl–PL–Metalchem, Gliwice–Lublin–Toruń 1980.
3.118. Misterek B., Niewiarowski Z., Werbliński W.: Nowoczesne maszyny przetwórcze. *Polimery* 7/1968.
3.119. Misterek B., Rzezak L.: Ocena struktury wtryskowych kształtek spienionych na podstawie własności mechanicznych. *Polimery* 3/1977.
3.120. Mohr J.G. i inni: „SPI Handbook of Technology and Engineering of Reinforced Plastics/Composites". Van Nostrand Reinhold Co., New York 1973.
3.121. Nalewajski W.: Dynamika przegubowego mechanizmu zamykania form wtryskarek. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1965.
3.122. New cooling and heating methods cut injection costs. *Modern Plastics International* 6/1980.
3.123. Niedziałek A.: Technologia hermetyzacji przetłocznej układów scalonych. „Tworzywa utwardzalne". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1989.

3.124. Niewiarowski Z.: Wtryskarki z układem odgazowania. *Mechanik* 6/1982.
3.125. Okrasa M.: Otrzymywanie wyprasek dwukolorowych. *Mechanik* 7/1984.
3.126. Pahl M.H.: Fördern, Dosieren und Mischen. *Kunststoffe* 1/1987.
3.127. Panszin J.A., Małkiewicz S.G., Dunajewska C.S.: „Tworzywa fluorowe". WNT, Warszawa 1982.
3.128. Patent brytyjski nr 1 156 217 oraz The ICI Sandwich Moulding Process. *Plastics and Rubber Weekly* 348/1970.
3.129. Patent Niemiecki — RFN nr 1 186 206.
3.130. Patent Polski nr 79 873.
3.131. Patenty Polskie nr 82 687, 83 570, 85 274, patenty USA nr 4 592 714 i 4 642 044, patenty austriackie nr 378 501 i 383 773, patent ZSRR nr 1 211 077, patent niemiecki — RFN nr 3 637 175.
3.132. Patent Polski nr 131 969.
3.133. Patent USA nr 4 594 371.
3.134. Перминова Л.А., Юрченко В.М., Шебунов Г.Т.: Изготовление армированных деталей из термопластов в литевой форме с магнитным устройством. *Химическое и Нефтяное Машиностроение* 6/1986.
3.135. Pik I.Sz.: „Produkcja wyrobów z tworzyw sztucznych". PWT, Warszawa 1956.
3.136. „Переработка пластмасс'' (praca zbiorowa pod red. В.А. Брагинского), Изд. Химия, Ленинград 1985.
3.137. „Plastics Extrusion Technology" (praca zbiorowa pod red. F. Hensena). Hanser Publishers, Munich – Vienna – New York 1988.
3.138. PN-79/M-66850.
3.139. PN-83/C-89291.19.
3.140. PN-91/M-68206.
3.141. „Polichlorek winylu" (praca zbiorowa pod red. I. Franty i F. Grundela). PWT, Warszawa 1955.
3.142. Potente H.: Schmelzkaschiertechnik. Discourse at the Ramisch-Kleinwefers Symposium at K 83 in Düsseldorf.
3.143. Potente H., Koch M.: Berechnung einer Mischgütekennzahl für Einschneckenextruder. *Kunststoffe* 9/1986.
3.144. „Processing of Thermoplastic Materials" (praca zbiorowa pod red. E.C. Bernhardta). Reinhold, New York 1962.
3.145. Przetwórstwo metodą wtryskiwania wieloskładnikowego tworzyw wzmocnionych włóknem szklanym. *Polimery* 7–8/1988.
3.146. Пугачев А.К., Рослияков О.А.: „Переработка фторопластов в изделия''. Изд. Химия, Ленинград 1987.
3.147. Rauwendaal Ch.: „Polymer extrusion". Hanser Publishers, Munich – Vienna – New York 1986.
3.148. Rogers K.: Why are molders buying so many giant injection machines. *Modern Plastics International* 3/1990.
3.149. Rozdział P.: „Technologia hermetyzacji sprzętu elektronicznego". WNT, Warszawa 1976.
3.150. Rumuński P., Gajewski A., Borkowski J.: Produkcja elementów z tworzyw wzmocnionych metodą nawijania włókien. *Polimery* 4/1967.
3.151. Сафулин Д.М.: Влияние состава композиций и параметров процесса екструзии на своиства вспененных ПВХ-пластикатов. *Пластические Массы* 8/1977.
3.152. Satanowska J., Stranc W., Gruszczyńska J.: Możliwości wykorzystania programu wtłaczania we wtryskarkach produkcji Żywieckiej Fabryki Maszyn. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988, oraz *Mechanik* 5–6/1990.
3.153. Schenkel G.: „Kunststoff-Extrudertechnik". Carl Hanser Verlag, München 1963.
3.154. Schiedrum H.: Entgasung an Ein- und Doppelschnecken-Extrudern. W pracy zbiorowej „Der Extruder als Plastifiziereinheit". VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1977.
3.155. Schlunke M., Paschke E.: Der Einfluss der Verarbeitungsbedingungen auf die Massabweichungen von Spritzgussteilen aus Acetalcopolymerisat und Polypropylen. *Plastverarbeiter* 2/1971.
3.156. Sikora R.: „Techniki wytwarzania — Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych". PWN, Warszawa 1987.

3.157. Sikora R.: „Tworzywa epoksydowe w naprawie maszyn". WNT, Warszawa 1971.
3.158. Sikora R.: Wpływ parametrów wtryskiwania na strukturę wyprasek z polietylenu. Prace Instytutu Technologii i Eksploatacji Maszyn Politechniki Lubelskiej seria B, nr 9, Lublin 1983.
3.159. Sikora R.: Zarys rozwoju procesu wytłaczania i produkcji wytłaczarek w Polsce. *Polimery* 6 i 7/1983.
3.160. Sikora R.: Znaczenie wytłaczania w przetwórstwie tworzyw sztucznych. *Przegląd Mechaniczny* 18/1980.
3.161. Sikora R. i inni: Sprawność energetyczna procesu wytłaczania tworzyw sztucznych. *Przegląd Mechaniczny* 22/1980.
3.162. Sikora R., Flizikowski J., Makhief A.A.: Następstwa zmian cech materiałowych koła zębatego z poliamidu przekładni pasowo-zębatej. *Archiwum Nauki o Materiałach* 3–4/1990.
3.163. Sikora KR., Hawrylecka U.: Możliwości i kryteria oceny wyprasek z tworzyw termoplastycznych. Prace Instytutu Technologii i Eksploatacji Maszyn Politechniki Lubelskiej seria C, nr 2, Lublin 1982.
3.164. Sikora R., Kloc J.: Probleme beim Präzisionsspritzgiessen in Mehrfach-Spritzgiesswerkzeugen. *Kunststoffe* 8/1982.
3.165. Sikora R., Kloc J.: Próba optymalizacji precyzyjnego wtryskiwania wielogniazdowego polietylenu. *Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń* 2/1984.
3.166. Sikora R., Luty J.: Analiza dźwigniowo-hydraulicznego układu narzędziowego wtryskarki. „Narzędzia i maszyny do przetwórstwa tworzyw sztucznych". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1990.
3.167. Sikora R., Tomaszewski J.: Efektywność procesu wytłaczania polietylenu. *Polimery* 4/1982.
3.168. Sikora R., Tomaszewski J., Szyc K.: Zużycie układów uplastyczniających maszyn do przetwórstwa tworzyw sztucznych. „Zużycie w urządzeniach technicznych". PAN–PK–AGH, Kraków 1978.
3.169. Smoluk G.R.: Performance-rich UHMWPE is becoming easier to process. *Modern Plastics International* 6/1989.
3.170. Smorawiński A.: „Technologia wtrysku". WNT, Warszawa 1989.
3.171. Smorawiński A.: Podstawy optymalizacji procesu wtrysku. *Mechanik* 5 i 7/1982.
3.172. Smorawiński A.: Uplastycznianie mieszanek elastomerowych w procesie wtrysku. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988.
3.173. Smorawiński A.: Wtrysk z odgazowaniem. *Mechanik* 12/1983.
3.174. Sobkowiak M.: Wtrysk tłoczyw epoksydowych. *Polimery* 6–7/1980.
3.175. Соколов А.Д., Швец М.М.: „Литие под давлением реактопластов". Изд. Химия, Ленинград 1989.
3.176. Sors L.: Spritzgiesswerkzeuge für zweifarbige Kunststoffteile. *Kunststoffe* 7/1979.
3.177. Stabik J.: Analiza wpływu wypełniaczy na rozszerzenie strugi polietylenu wypływającego z kanału okrągłego. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1988.
3.178. Stamprech P.: Ramextrusion von Polytetrafluorethylen. *Plastverarbeiter* 2/1980.
3.179. „Spritzgiessen" (praca zbiorowa pod red. G. Mengesa). Carl Hanser Verlag, München–Wien 1979.
3.180. Stasiek J.: Optymalizacja konstrukcji ślimaka oraz parametrów technologicznych w procesie wytłaczania polietylenu. *Przegląd Mechaniczny* 11/1984.
3.181. Stasiek J.: Wpływ elementów konstrukcyjnych ślimaka oraz parametrów technologicznych na jakość uplastyczniania w procesie wytłaczania. *Polimery* 1/1983.
3.182. Stasiek J.: Współczesne kierunki rozwoju w konstrukcji układów uplastyczniających wytłaczarek jednoślimakowych do polietylenu. *Polimery* 1/1981.
3.183. Stasiek J.: Wytłaczarki dwuślimakowe oraz porównanie ich z wytłaczarkami jednoślimakowymi. *Polimery* 10–11/1976.
3.184. Stasiek J., Dzwonkowski J., Kołodziej R.: Problemy doskonalenia i oceny przebiegu procesu mieszania w wytłaczarce jednoślimakowej. *Przemysł Chemiczny* 1/1983.
3.185. Stefański M.: Wpływ konstrukcji strefy zasilania na wydajność wytłaczarek. *Mechanik* 1/1980.
3.186. Sterzyński T.: Odlewanie dużych elementów z żywic epoksydowych. *Przegląd Mechaniczny* 3/1977.
3.187. Stoltz M.: Verwendung von expandiertem Polytetrafluorethylen (e-PTFE) als medizinisches Implantat. *Österreichische Chemie Zeitschrift* 10/1988.

3.188. Stranc W.: Badania wpływu wybranych parametrów przetwórczych na wymiary i masę kształtek wtryskowych z tłoczyw poliestrowo-szklanych. „Tworzywa utwardzalne". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1989.
3.189. Stranc W., Gruszczyńska J., Satanowska J.: Niektóre rozwiązania konstrukcyjne w procesie bezodpadowego wtryskiwania tworzyw utwardzalnych i gumy. *Polimery* 2/1988.
3.190. Stranc W., Królikowski W., Błędzki A.: Wtrysk tłoczyw poliestrowych. *Polimery* 5/1983.
3.191. Stretch-blow injection machine makes half-L bottles. *Modern Plastics International* 2/1985.
3.192. Stręk F.: „Mieszanie i mieszalniki". WNT, Warszawa 1981.
3.193. Suchorzewski T.: „Prasowanie tłoczyw fenolowych". PWT, Warszawa 1955.
3.194. Szydłowski W., Brzoskowski R.: Model matematyczny procesu wypełniania gniazd form wtryskowych przez termoplastyczne tworzywo sztuczne. *Polimery* 3/1984.
3.195. Szydłowski W., Brzoskowski R.: Weryfikacja empiryczna modelu matematycznego procesu wypełniania gniazd form wtryskowych. *Polimery* 1/1984.
3.196. Ścigała R., Włochowicz A.: Gęstość pozorna i porowatość prasówek z politetrafluoroetylenu. *Inżynieria Materiałowa* 1/1988.
3.197. Talarczyk T.: Wtryskarki do tworzyw porowatych. *Przegląd Mechaniczny* 20/1974.
3.198. „Техника переработки пластмасс" (praca zbiorowa pod red. Н.И. Басова и В. Броя). Изд. Химия, Москва 1985.
3.199. Theberge J.: IM Alternatives Produce Performance Advantages. *Plastics Engineering* 2/1991.
3.200. Tokarzewska M. i inni: Formowanie rotacyjne polimerów termoplastycznych. *Polimery* 5/1978.
3.201. Tunbridge T.: TAF process for PS structural foam. *Europlastics* 7/1973.
3.202. Urządzenie rotacyjne 300. Opracowanie OBR Metalchem, Toruń 1977.
3.203. Warych J., Młodziński B.: Mieszanie tworzyw sztucznych z barwnikiem w mieszalniku typu V. *Polimery* 10–11/1976.
3.204. Wąsowicz H.: „Tworzywa sztuczne w modelarstwie odlewniczym". WNT, Warszawa 1963.
3.205. Werbliński W.: Wpływ warunków formowania na udarność wyrobów z modyfikowanego PVC. *Polimery* 3/1985.
3.206. Winkler J., Maj W.: Lane tworzywa epoksydowe w izolacji sieci trakcyjnej PKP. *Polimery* 3–4/1986.
3.207. Wood A.S.: Pultrusion: it's getting to be something extra in RP processing. *Modern Plastics International* 7/1983.
3.208. Wróbel K., Łuczaj J.: „Wytłaczanie tworzyw sztucznych". PWT, Warszawa 1961.
3.209. Zawistowski H.: Kryteria doboru wtryskarek. *Polimery* 6/1969.
3.210. Zawistowski H., Frenkler D.: „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych". WNT, Warszawa 1984.
3.211. Ziabicki A.: „Fizyka procesów formowania włókien". WNT, Warszawa 1970.
3.212. Żenkiewicz M., Kubiaczyk F.: Filtry uplastycznionego polimeru. *Mechanik* 7 i 10/1988.

Rozdział 4

METODY PRZETWÓRSTWA CHEMICZNO-FIZYCZNEGO

4.1. Formowanie polimeryzacyjne

Formowanie polimeryzacyjne jest metodą przetwórstwa, w której zachodzą jednocześnie dwa procesy: proces polimeryzacji w sensie syntezy ze składników elementarnych, np. monomerów i środków pomocniczych, oraz proces formowania gotowych do użytkowania wytworów, które mogą mieć budowę litą lub porowatą. Nosi ono niekiedy w literaturze kontrowersyjną nazwę *wtrysku reaktywnego*. Formowanie to znalazło dotychczas największe zastosowanie w odniesieniu do poliuretanu, poliamidu i polimetakrylanu metylu.

4.1.1. Formowanie polimeryzacyjne PUR

Poliuretany powstają w wyniku polimeryzacji addycyjnej, zachodzącej pomiędzy organicznymi izocyjanianami i związkami hydroksylowymi, zwanymi powszechnie poliolami, w obecności wielu odpowiednio dobranych środków pomocniczych, według następującego schematu:

$$\underset{\text{poliol}}{R{-}OH} + \underset{\text{izocyjanian}}{OCN{-}R'} \xrightarrow{\text{katalizator}} \underset{\text{uretan}}{R{-}O{-}CO{-}NH{-}R'} + Q \qquad (4.1)$$

w którym R i R′ oznaczają rodniki, natomiast Q oznacza jednostkową ilość ciepła.

Jeżeli w reakcji biorą udział związki chemiczne zawierające co najmniej dwie zdolne do reagowania grupy funkcyjne (NCO i OH), to reakcja ma charakter łańcuchowy, a jej produktem jest polimer uretanowy.

Aby otrzymać tworzywo spienione, należy wytworzyć, podczas egzotermicznego procesu polimeryzacji addycyjnej (4.1), gaz spieniający polimer uretanowy. Możliwe to jest w następujących głównych przypadkach:

a) na drodze chemicznej — w wyniku reakcji chemicznej między izocyjanianem i wodą wprowadzoną w poliolu

$$\underset{\text{izocyjanian}}{R'{-}NCO} + \underset{\text{woda}}{HOH} \rightarrow \underset{\text{amina}}{R'{-}NH_2} + \underset{\text{dwutlenek węgla}}{CO_2\uparrow} \qquad (4.2)$$

Sposób ten nie znalazł szerszego zastosowania ze względu na niewystarczające właściwości, głównie mechaniczne i cieplne, spienionego poliuretanu;

b) na drodze fizycznej — poprzez odparowanie nisko wrzących cieczy, np. freonu 11 ($CFCl_3$), wprowadzanych do poliolu bądź oddzielnie, zachodzące dzięki egzotermicznej reakcji polimeryzacji addycyjnej [Q we wzorze (4.1) wynosi około 200 J/g].

Materiał wejściowy do formowania polimeryzacyjnego PUR stanowi mieszanina w odpowiednich proporcjach i kolejności [4.4, 4.68, 4.105, 4.109, 4.110]:

a) składników podstawowych

— polioli o masie cząsteczkowej $500 \div 900$ i funkcyjności $3 \div 8$, przede wszystkim poliestru lub polieteru,

— izocyjanianów o dwóch i więcej grupach izocyjanianowych w cząsteczce, np. 2,4-diizocyjanianu toluilenu lub 4,4'-diizocyjanianu difenylometanu,

b) środków pomocniczych

— katalizatorów regulujących czas trwania polimeryzacji addycyjnej, w zakresie od kilku sekund do kilku minut, często trzeciorzędowych amin lub związków metaloorganicznych,

— stabilizatorów regulujących napięcie powierzchniowe spieniającej się masy i poprzez to regulujących rozmiary porów, ich równomierność, a także to, czy struktura jest zamknięto- czy otwartokomórkowa, najczęściej olejów polisiloksanopolialkilenowych,

— emulgatorów zapobiegających rozdziałom fazowym mieszaniny,

— poroforów, głównie freonu 11 lub freonu 12,

— przedłużaczy łańcucha nadających wytworom właściwości elastomerów, na ogół glikolu 1,4-butylenowego lub 3,3-dichloro-4,4-di(aminofenylo)metanu,

— innych środków pomocniczych, np. opóźniaczy palenia, rozpuszczalników i środków barwiących.

W zależności od rodzaju i proporcji użytych składników podstawowych oraz środków pomocniczych, jak również warunków polimeryzacji, otrzymuje się wytwory lite lub spienione, o wyjątkowo zróżnicowanych właściwościach: elastomery, wytwory półsztywne oraz sztywne, termoplastyczne lub utwardzalne. Wytwory spienione noszą nazwę *pianek*. Trzeba dodać, że ze względów ekologicznych wprowadza się pianki bezfreonowe.

Ogólnie ujmując, proces formowania polimeryzacyjnego PUR składa się z następujących operacji: mieszania wstępnego, przechowywania, dozowania, mieszania właściwego i wypełniania gniazda formy przetwórczej lub przestrzeni nie będącej gniazdem w ścisłym tego słowa znaczeniu. Na ogół operuje się dwoma zestawami odwodnionych składników, to jest zestawem A, będącym mieszaniną poliolu i niezbędnych środków pomocniczych, otrzymaną podczas mieszania wstępnego, oraz zestawem B, stanowiącym odpowiedni rodzaj izocyjanianu. Oba zestawy składników przechowuje się w zbiornikach roboczych przez określony czas w danej temperaturze, np. w temperaturze $22 \div 25°C$. Ze zbiorników roboczych zestawy A i B są dozowane w stosunkach stechiometrycznych w sposób ściśle powtarzalny, pod zwiększonym ciśnieniem, za pomocą pomp zębatych, tłokowych szeregowych, wielotłokowych

promieniowych lub osiowych, do mieszarek łapowych, śmigłowych i innych bądź częściej do głowic mieszających (rozdz. 3, p. 3.7.1). Mieszanie właściwe jest traktowane jako operacja o szczególnie dużym znaczeniu. Mieszaninę reaktywną wprowadza się pod ciśnieniem do gniazda formy otrzymując, po procesie polimeryzacji addycyjnej, gotowe do użytkowania przedmioty lite lub pianki.

Za pomocą formowania polimeryzacyjnego PUR można również otrzymywać przedmioty lite i spienione, w obu przypadkach napełnione lub wzmocnione, głównie włóknami krótkimi, tkaninami i matami oraz wolastonitem $Ca_3[Si_3O_9]$. Gdy stosuje się włókna krótkie, należy je dodatkowo zmieszać z jednym z zestawów, *A* lub *B*.

Ocenia się, że około 90% wytworów z PUR to pianki, z czego 1/2 stanowią pianki miękkie, a 1/3 sztywne [4.22]. Z tego powodu proces spieniania PUR ma wyjątkowo duże znaczenie. W procesie tym wyróżnia się kilka charakterystycznych okresów [4.62]:

a) *okres utajony*, który trwa od chwili zmieszania składników do momentu rozpoczęcia wzrostu objętości mieszaniny,

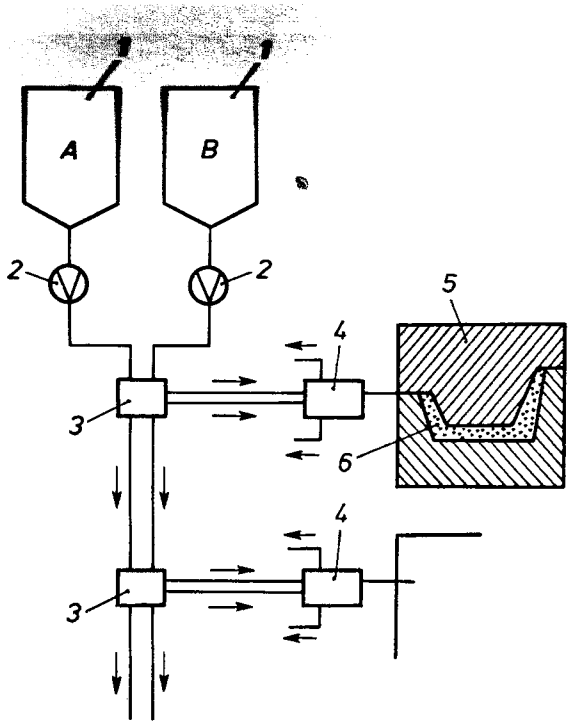
b) *okres wzrostu* trwający od chwili rozpoczęcia wzrostu objętości mieszaniny do momentu uzyskania przez nią największej objętości; zachodzi tu egzotermiczna reakcja polimeryzacji (4.1) powodująca odparowanie nisko wrzących cieczy, a gaz spulchnia mieszaninę pozostającą jeszcze w stanie plastycznym, nadając jej strukturę komórkową; w okresie tym zachodzi również reakcja chemiczna (4.2),

c) *okres stabilizowania*, zwany także *okresem żelowania*, w którym spieniona mieszanina przekształca się w stabilne pod względem właściwości tworzywo; w okresie tym zachodzi jeszcze reakcja (4.1) oraz zachodzą reakcje uboczne tworzenia wiązań allofanowych i biuretowych,

d) *okres dojrzewania pianki*, w którym zachodzą do końca wszystkie trwające reakcje chemiczne, następuje ostateczne ustalenie struktury oraz ustalenie właściwości, kształtu i rozmiarów pianki; okres ten trwa na ogół do kilkunastu godzin.

Formowanie polimeryzacyjne PUR może się odbywać kilkoma technikami. Ważniejsze z nich są następujące.

Technika RIM (ang. *Reaction Injection Molding*) polega na ciągłym sporządzaniu mieszaniny opuszczającej głowicę mieszającą pod ciśnieniem $3 \div 25$ MPa i kolejnym wypełnianiu zamkniętych gniazd form przetwórczych, gdzie mieszanina przemienia się w przedmiot (rys. 4.1). Bardzo często stosuje się kilka lub kilkanaście głowic oddzielonych lub wbudowanych w formę. Wówczas, gdy pracuje jedna głowica, w pozostałych zachodzi cyrkulacja. Technikę RIM zapoczątkowała amerykańska firma General Motors w 1974 r. [4.22]. Lepkość mieszaniny opuszczającej głowicę wynosi zazwyczaj $0{,}5 \div 1{,}5$ Pa · s, a więc jest $100 \div 2000$ razy mniejsza niż lepkość tworzyw opuszczających układ uplastyczniający podczas wtryskiwania w porównywalnych warunkach [4.7]. Czas trwania procesu nie przekracza 3 min, a nawet może być skrócony do 30 s [4.108]. Ciśnienie tworzywa w gnieździe zazwyczaj nie przekracza 0,35 MPa [4.32], zatem siła zamknięcia formy jest mała i na ogół wynosi $1 \div 2\%$ siły przy wtryskiwaniu w porównywalnych warunkach (tabl. 4.1). Niskie ciśnienie w gnieździe zmniejsza skurcz przetwórczy i naprężenia własne przedmiotów. Proces realizuje się za pomocą pras hydraulicznych o nacisku do 1,5 MN o specjalnej



Rys. 4.1. Schemat techniki RIM: *1* — przechowywanie w zbiornikach roboczych zmieszanych wstępnie zestawów *A* i *B* składników, *2* — dozowanie, *3* — rozdzielanie zestawów *A* i *B*, *4* — mieszanie właściwe zestawów, komorowe wtryskowe, w głowicy mieszającej, *5* — forma przetwórcza, *6* — przedmiot z PUR (lity bądź pianka)

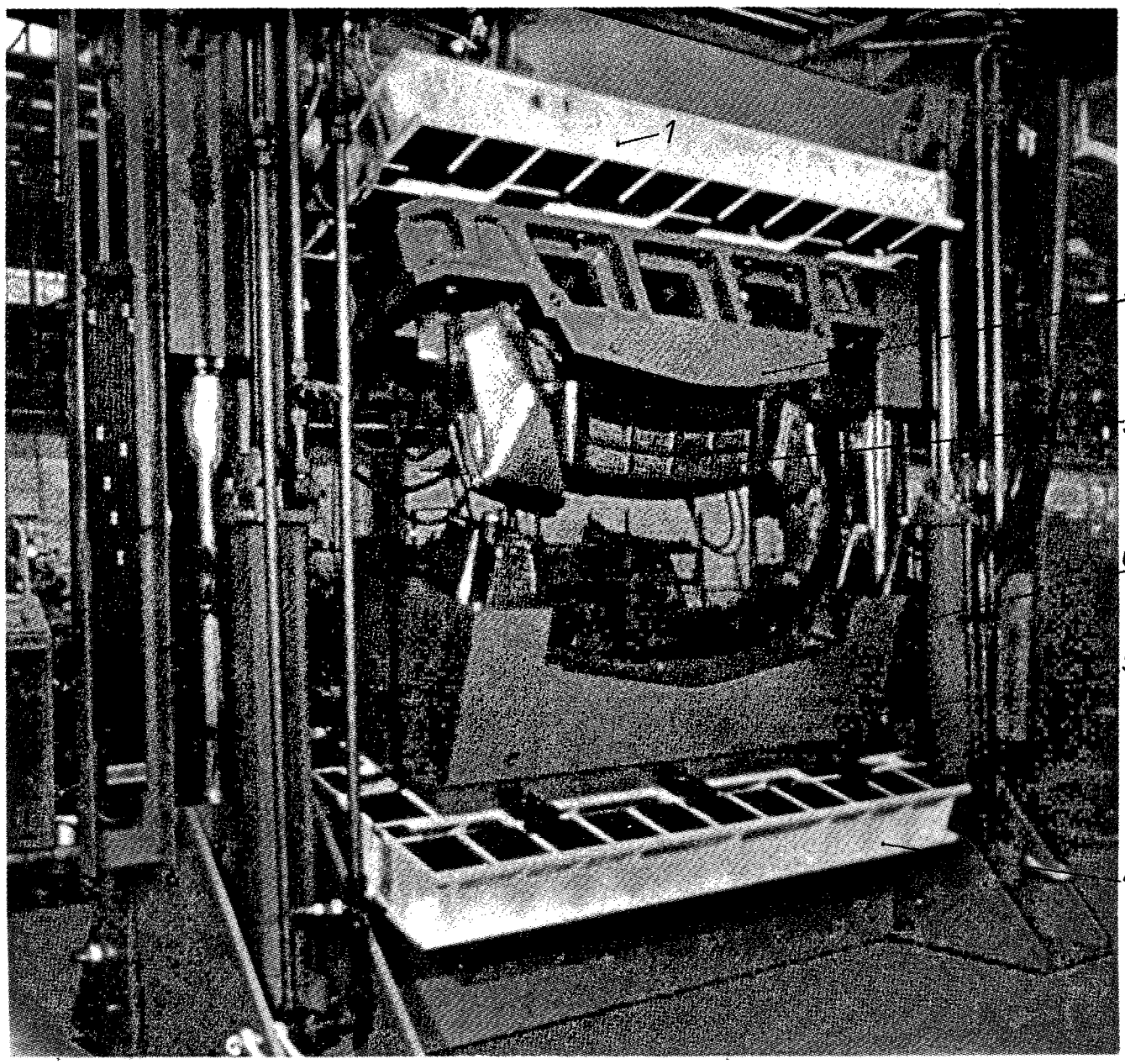
Tablica 4.1

Siła zamknięcia formy w technice RIM i przy wtryskiwaniu [4.32]

Pole powierzchni rzutu wypraski i kanałów na płaszczynę podziału formy, m^2	Siła zamknięcia, MN	
	RIM	Wtryskiwanie tworzyw termoplastycznych
0,03	0,02	1,47
0,07	0,05	2,94
0,13	0,10	5,88
0,26	0,20	11,77
0,52	0,40	23,54
0,97	0,74	44,15

konstrukcji, np. z uchylnym do $(\pi/4)$ rad stołem górnym, co ułatwia wyjmowanie przedmiotów z gniazda (rys. 4.2). Z zasady techniką RIM wytwarza się przedmioty o stosunkowo dużych rozmiarach i masie na ogół $3 \div 10$ kg oraz grubości ścianek do 10 mm, zwłaszcza elementy konstrukcyjne i elementy wyposażenia pojazdów, np. zderzaki samochodowe (rys. 4.3).

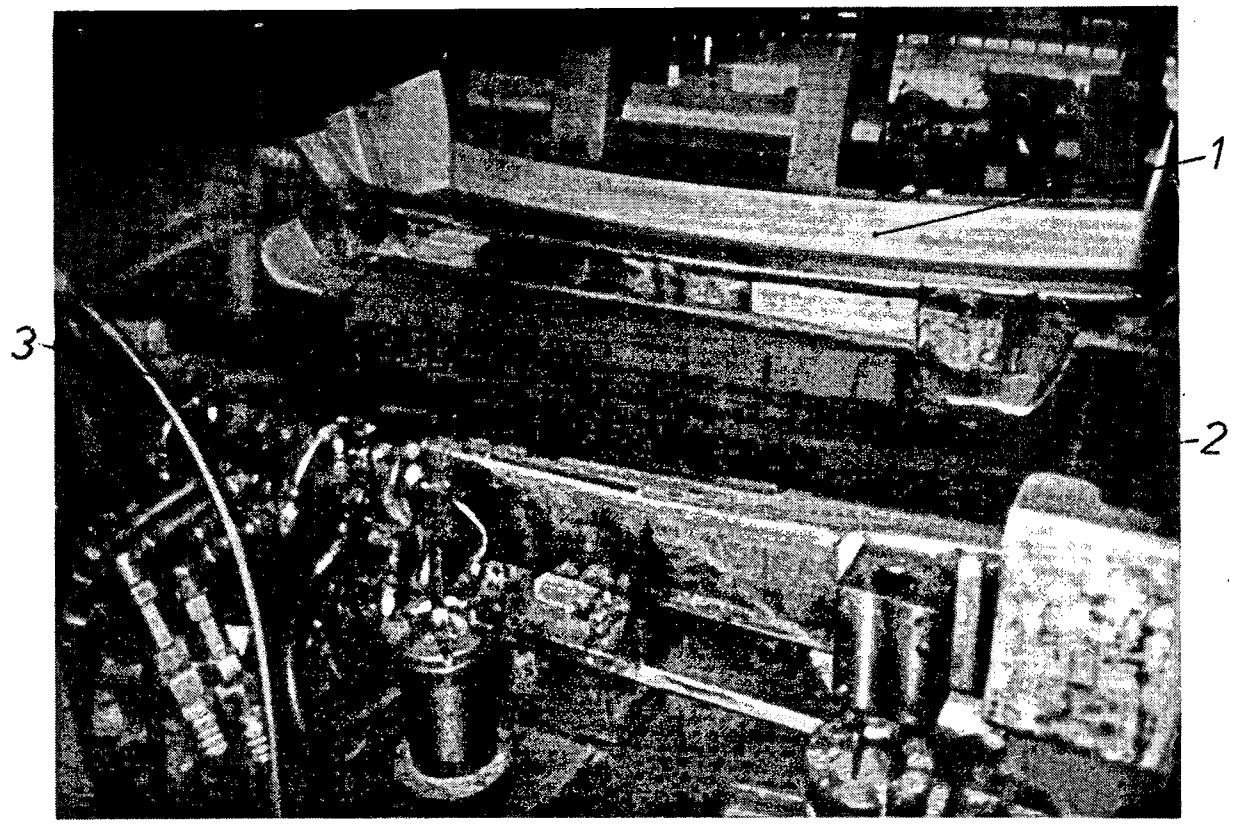
Technika RRIM (ang. Reinforced Reaction Injection Molding) jest w istocie podobna do techniki RIM z tą zasadniczą różnicą, że do mieszaniny wprowadza się napełniacz w postaci na ogół krótkiego włókna szklanego w ilości do 40% obj. Włókno po cięciu miesza się z poliolem lub z izocyjanianem w oddzielnych mieszarkach. Zestaw zawierający napełniacz krótkowłóknisty, a później mieszanina z nim, oddziałuje ściernie na urządzenia. Z tego powodu oraz ze względu na większą lepkość spowodowaną zawartością napełniacza dozowanie odbywa się za pomocą pomp membranowych lub nurnikowych, a w głowicach mieszających często eliminuje się przepływ cyrkulacyjny. Elementy narażone na największe ścieranie wykonuje się z materiałów szczególnie odpornych na zużycie ścierne, głównie z węglików wolframu lub z ceramiki.



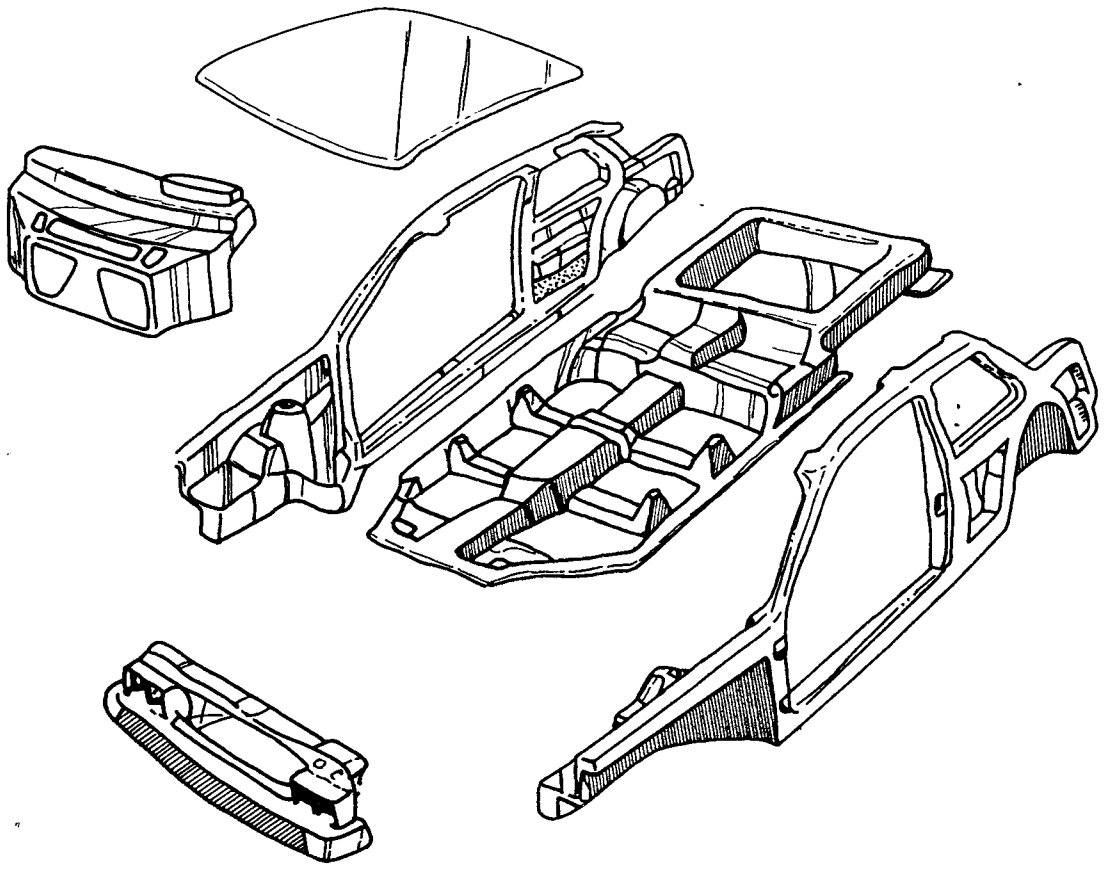
Rys. 4.2. Prasa hydrauliczna do formowania PUR techniką RIM z uchylnym do ($\pi/4$) rad stołem (*1*) i podzespołem ruchomym (*2*) ze stemplem (*3*) formy oraz z poziomym stołem (*4*) i podzespołem nieruchomym (*5*) formy, z matrycą (*6*), produkcji firmy Mobay Machinery (USA)

Technika SRIM (ang. *Structural RIM*) jest również podobna do techniki RIM, ale w przeciwieństwie do techniki RRIM stosuje się w niej napełniacz arkuszowy, nazywany preformą [4.104]. Preformę stanowi element o kształcie zbliżonym do kształtu przedmiotu, wykonany poprzez laminowanie natryskowe i następnie prasowanie płytowe kształtowe lub kształtowe prasowanie pneumatyczne próżniowe (rozdz. 3, p. 3.3.3). Preformę układa się w gnieździe formy do formowania PUR i postępuje jak w przypadku RIM. Techniką tą otrzymuje się przedmioty o dużych rozmiarach (do 1,5 m) i bardzo skomplikowanych kształtach (rys. 4.4) z zawartością preformy do 50% i więcej [4.79].

Technika RI–RIM (ang. *Rotary Injection – RIM*), zapoczątkowana w 1988 r. [4.8], polega na ciągłym sporządzaniu mieszaniny w specjalnej mieszarce z mieszadłem obrotowym i cyklicznym wypełnianiu gniazda formy, w którym mieszanina prze-

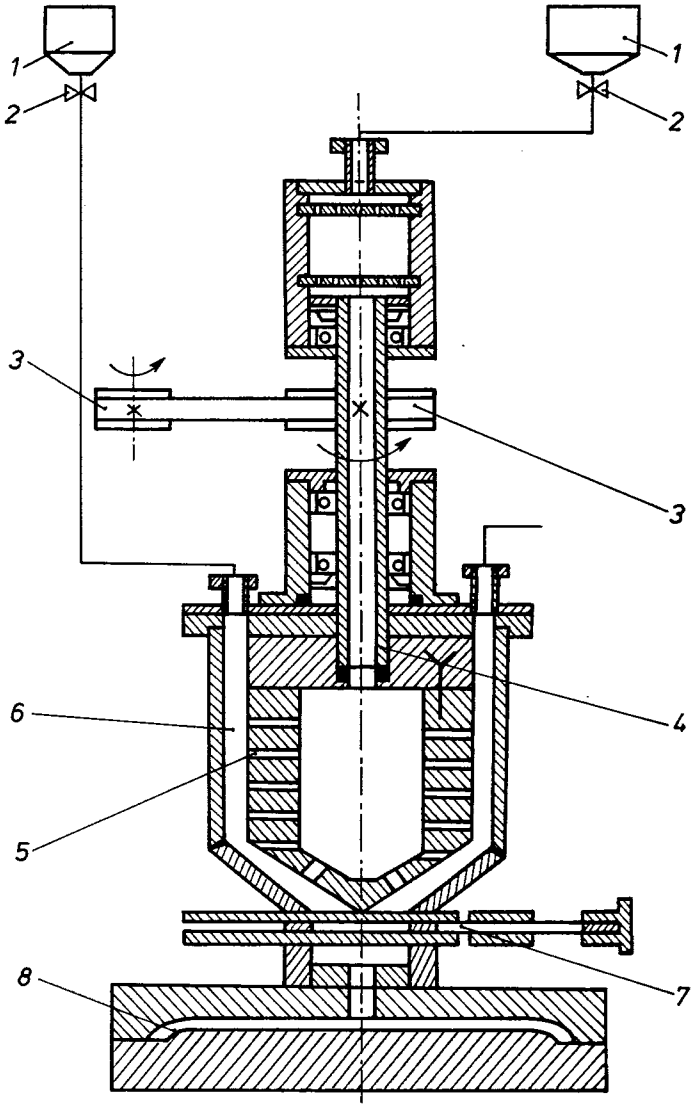


Rys. 4.3. Fragment otwartej formy dwugniazdowej do formowania zderzaka samochodu „Polonez" z PUR techniką RIM: *1* — matryca gniazda I, *2* — zderzak znajdujący się w matrycy gniazda II, *3* — głowica mieszająca do gniazda I; oba stemple są obrotowe i znajdują się w górnym położeniu, niewidocznym na zdjęciu (ZAS Polmo w Elblągu)



Rys. 4.4. Przykładowe wytwory — części nadwozi samochodowych otrzymywane techniką SRIM według firmy Krauss-Maffei (Niemcy)

mienia się w przedmiot (rys. 4.5). Składnik A doprowadza się kanałem wzdłużnym w wale mieszadła i w samym mieszadle, skąd kanałami promieniowymi pod wpływem siły odśrodkowej przepływa do szczeliny mieszającej, natomiast składnik B wprowadza się bezpośrednio do szczeliny. Mieszadło obraca się z prędkością obrotową $4 \div 17\ s^{-1}$, dozowanie odbywa się za pomocą pomp zębatych o wydajności $1{,}0 \div 3{,}5$ l/min; ciśnienie mieszaniny opuszczającej mieszarkę wynosi $0{,}1 \div 1{,}0$ MPa. Do podstawowych zalet tej techniki zalicza się intensywne mieszanie o dobrej jakości, ze znacznym udziałem ścinania zachodzącego w szczelinie.



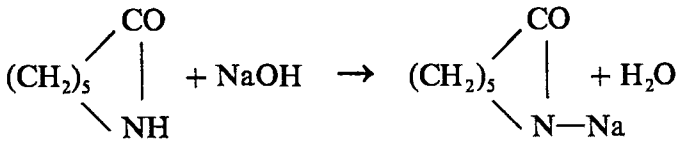
Rys. 4.5. Schemat techniki RI–RIM: *1* — zbiorniki zestawów składników, *2* — pompy dozujące, *3* — napęd mieszadła, *4* — mieszadło z kanałem wzdłużnym i kanałami promieniowymi, *5* — kanały promieniowe, *6* — szczelina, *7* — zasuwa spustowa, *8* — gniazdo

4.1.2. Formowanie polimeryzacyjne PA

Z wielu znanych technik polimeryzacji poliamidu do formowania polimeryzacyjnego szczególnie odpowiednia jest technika polimeryzacji anionowej kaprolaktamu, prowadząca do otrzymania poliamidu 6. Kaprolaktam jest bezbarwnym

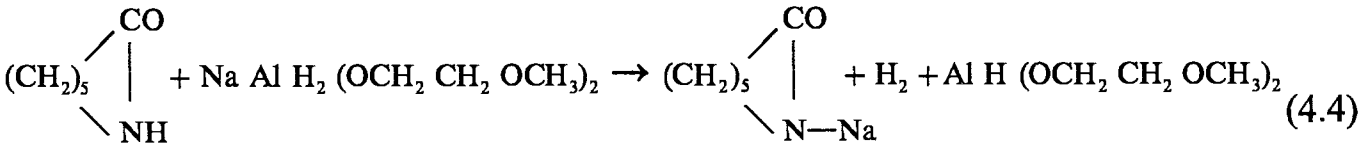
i krystalicznym ciałem stałym, ma charakter słabego kwasu i ulega polimeryzacji w rezultacie otwarcia swego pierścienia [4.100]. Czas polimeryzacji czystego i suchego kaprolaktamu w atmosferze gazu obojętnego w temperaturze 200÷250°C przekracza 600 h [4.74]. Konieczne jest więc stosowanie inicjatorów i aktywatorów polimeryzacji [4.29].

Polimeryzację anionową kaprolaktamu prowadzi się efektywnie w obecności wodorotlenku sodu NaOH. W pierwszym etapie po wprowadzeniu NaOH do stopionego kaprolaktamu powstaje pochodna sodowa (sól kaprolaktamu), która jest rzeczywistym inicjatorem polimeryzacji. Reakcja przyłączenia sodu przez kaprolaktam przebiega w sposób następujący:



(4.3)

Wadą stosowania wodorotlenku sodu jest konieczność usuwania wody ze środowiska reakcji, jest ona bowiem silnym inhibitorem polimeryzacji. Zamiast wodorotlenku sodu można stosować diwodorek bis(2-metoksyetoksy)glinowo-sodowy, który obok dobrych zdolności inicjujących ma tę zaletę, że usuwa do stężenia 0,035% mas. wodę zawartą w kaprolaktamie. Zakłada się, że reakcja tego związku z kaprolaktamem jest następująca:



(4.4)

Powstający w reakcji związek Al H $(OCH_2\,CH_2\,OCH_3)_2$ ulega wobec nadmiaru kaprolaktamu reakcji laktamolizy [4.39]. Wydzielający się w wyniku reakcji laktamolizy 2-metoksyetanol jako alkohol pierwszorzędowy jest również inhibitorem polimeryzacji i dlatego szybkość reakcji (4.4) jest nieco mniejsza niż (4.3). Wydzielanie wodoru w reakcji (4.4) jest jej wadą, w związku z czym można stosować dikaprolaktamian bis(2-metoksyetoksy)glinowo-sodowy i wówczas w reakcji z kaprolaktamem wodór się nie wydziela [4.38].

Materiał wejściowy do formowania polimeryzacyjnego PA stanowi mieszanina, w odpowiednich proporcjach i kolejności, na ogół:

— kaprolaktamu o przeciętnej zawartości wody mniejszej niż 0,03% mas.,

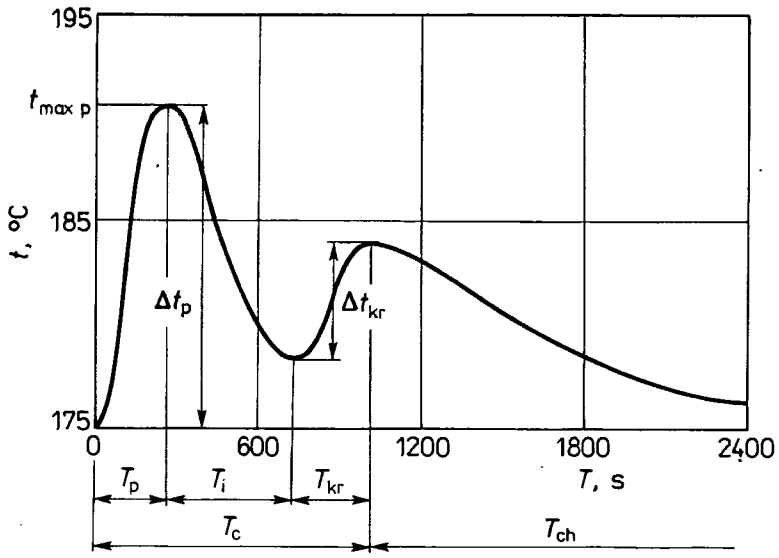
— inicjatora polimeryzacji: diwodorku bis(2-metoksyetoksy)glinowo-sodowego w postaci 70-procentowego roztworu w toluenie lub dikaprolaktamianu bis(2-metoksyetoksy)glinowo-sodowego w postaci 80-procentowego roztworu w toluenie,

— aktywatora polimeryzacji: jednofunkcyjnego — *N*-acetylokaprolaktamu, bądź dwufunkcyjnego — 2,4-diizocyjanianu toluilenu,

— poroforu: 1,6-diizocyjanianu heksametylenowego lub diazoaminobenzenu.

Stosując trzy pierwsze składniki otrzymuje się przedmioty lite, wprowadzając porofor — przedmioty spienione. Przykładowo przedmioty lite otrzymano w ten sposób [4.38], że najpierw stapiano kaprolaktam i po nagrzaniu go do temperatury 100±5°C wprowadzano do niego dikaprolaktamian bis(2-metoksyetoksy)glino-

wo-sodowy w ilości 0,3% mol. w stosunku do kaprolaktamu, następnie do mieszaniny reaktywnej nagrzanej do temperatury 140 ± 2°C dozowano 2,4-diizocyjanian toluilenu w ilości 0,15% mol. Przedmioty spienione natomiast otrzymano [4.14] stapiając i podgrzewając kaprolaktam do temperatury 120 ± 5°C oraz wprowadzając diwodorek bis(2-metoksyetoksy)glinowo-sodowy w ilości 0,65% mol., z kolei nagrzano mieszaninę do temperatury 135 ± 5°C i dozowano najpierw 2,4-diizocyjanian toluilenu w ilości 0,65% mol., a później diazoaminobenzen w ilości 1% mas. Możliwości w zakresie rodzaju i proporcji użytych składników nie są zbyt rozległe i z tego powodu właściwości przedmiotów z PA 6 nie mieszczą się w tak szerokim zakresie, jak przedmiotów z PUR.



Rys. 4.6. Zależność temperatury t od czasu T formowania polimeryzacyjnego PA 6 [kaprolaktam, diwodorek bis(2-metoksyetoksy)glinowo-sodowy o nazwie Synhydrid, 2,4-diizocyjanian toluilenu o nazwie Izocyn T-80] [4.38, 4.39]

Proces formowania polimeryzacyjnego PA polega — ogólnie biorąc — na tym, że do gniazda formującego formy nagrzanej do temperatury 170 ÷ 180°C wlewa się sporządzoną uprzednio mieszaninę reaktywną. W gnieździe zachodzą procesy polimeryzacji anionowej, następnie nukleacji i krystalizacji, po których przedmiot jest ochładzany w określonych warunkach, często wraz z formą. Proces formowania odznacza się następującymi głównymi wielkościami (rys. 4.6):

Δt_p — przyrost temperatury spowodowany egzotermiczną reakcją polimeryzacji anionowej,

Δt_{kr} — przyrost temperatury wynikajacy z egzotermiczności krystalizacji,

$t_{max\ p}$ — najwyższa temperatura polimeryzacji,

T_p — czas polimeryzacji,

T_n — czas nukleacji,

T_{kr} — czas krystalizacji,

T_i — czas łączny procesów podstawowych

$$T_i = T_p + T_n + T_{kr} \tag{4.5}$$

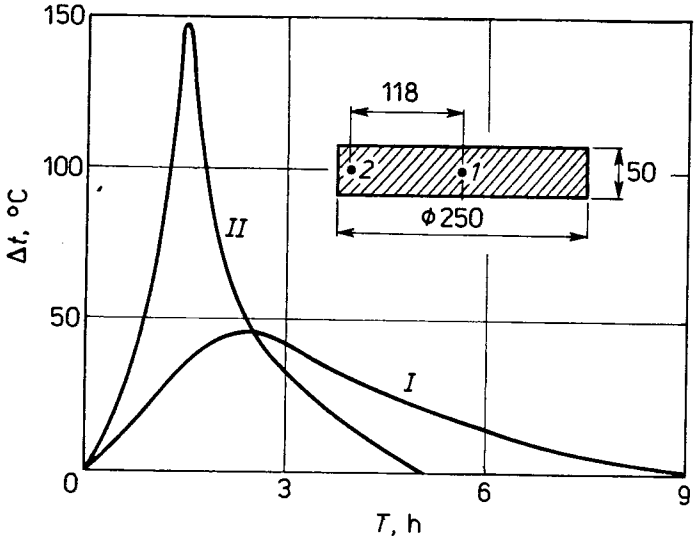
T_{ch} — czas ochładzania,
T_c — czas całkowity

$$T_c = T_f + T_{ch} \tag{4.6}$$

lub

$$T_c = T_p + T_n + T_{kr} + T_{ch} \tag{4.7}$$

Formowanie polimeryzacyjne PA znalazło szczególne zastosowanie do wytwarzania przedmiotów o dużych rozmiarach i grubych ściankach, trudnych do otrzymania innymi metodami przetwórstwa. Do specyficznych zagadnień z tym związanych należy duża różnica temperatury w poszczególnych miejscach przedmiotu, zwłaszcza przy ochładzaniu po wyjęciu z gniazda (rys. 4.7), spowodowana głównie małym współczynnikiem przewodzenia ciepła, oraz znaczny gradient szybkości ochładzania,



Rys. 4.7. Zależność różnicy temperatury Δt w charakterystycznych miejscach *1* i *2* przedmiotu od czasu ochładzania T przy temperaturze formy 180°C: *I* — ochładzanie z formą, *II* — ochładzanie po wyjęciu z formy o temperaturze 60°C w powietrzu o temperaturze 20°C [4.95]

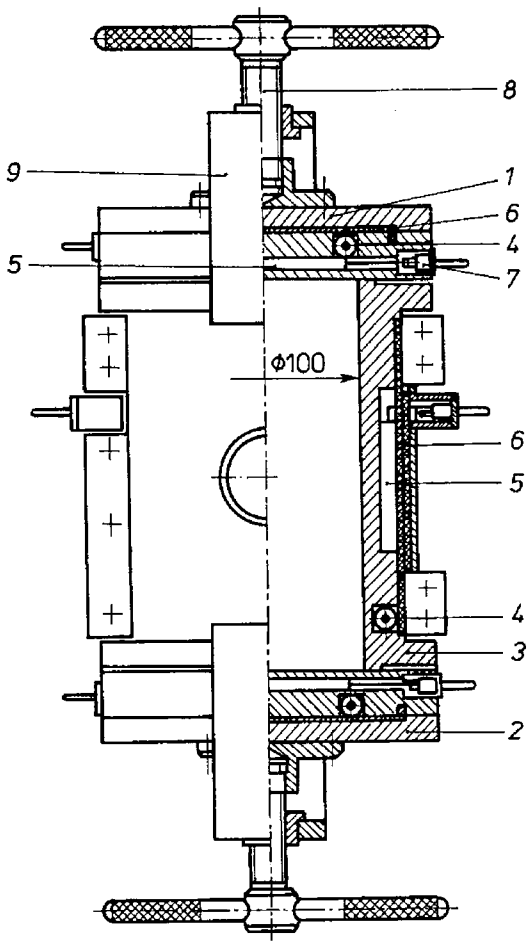
z wszystkimi konsekwencjami. W przypadku przedstawionym na rys. 4.7 gradient szybkości ochładzania definiuje się zgodnie z ogólną zależnością w postaci

$$\text{grad } v_{ch} = \frac{v_{ch2} - v_{ch1}}{R} \tag{4.8}$$

gdzie v_{ch} oznacza szybkość ochładzania odpowiednio w miejscach *2* oraz *1*, R zaś — promień przedmiotu (125 mm). T. Sterzyński [4.95] wykazał, że gdy przedmiot ochładzał się razem z formą, wówczas grad $v_{ch} = 0{,}0113 \div 0{,}0183$ K/(s·m), natomiast jeżeli ochładzał się w wodzie, oleju lub powietrzu, grad $v_{ch} = 0{,}1251 \div 0{,}3$ K/(s·m). Zalecana szybkość ochładzania wynosi $0{,}44 \div 0{,}57$ K/min [4.96].

Proces spieniania PA prowadzi się w zamkniętych formach z regulowaną temperaturą (rys. 4.8). Pianki mają gęstość pozorną zazwyczaj od 160 do 560 kg/m^3 [4.13, 4.14].

Formowanie polimeryzacyjne PA może się odbywać, podobnie jak PUR, techniką RIM [4.37, 4.82, 4.92], np. za pomocą urządzeń firmy Badische Co lub Cincinnati Milacron (USA).



Rys. 4.8. Forma do spieniania PA 6 w procesie polimeryzacji anionowej: *1* — pokrywa górna, *2* — pokrywa dolna, *3* — tuleja, *4* — grzejnik elektryczny, *5* — czujnik pomiaru i regulacji temperatury, *6* — izolacja cieplna, *7* — złącze elektryczne, *8* — śruba dociskowa, *9* — obejma [4.13]

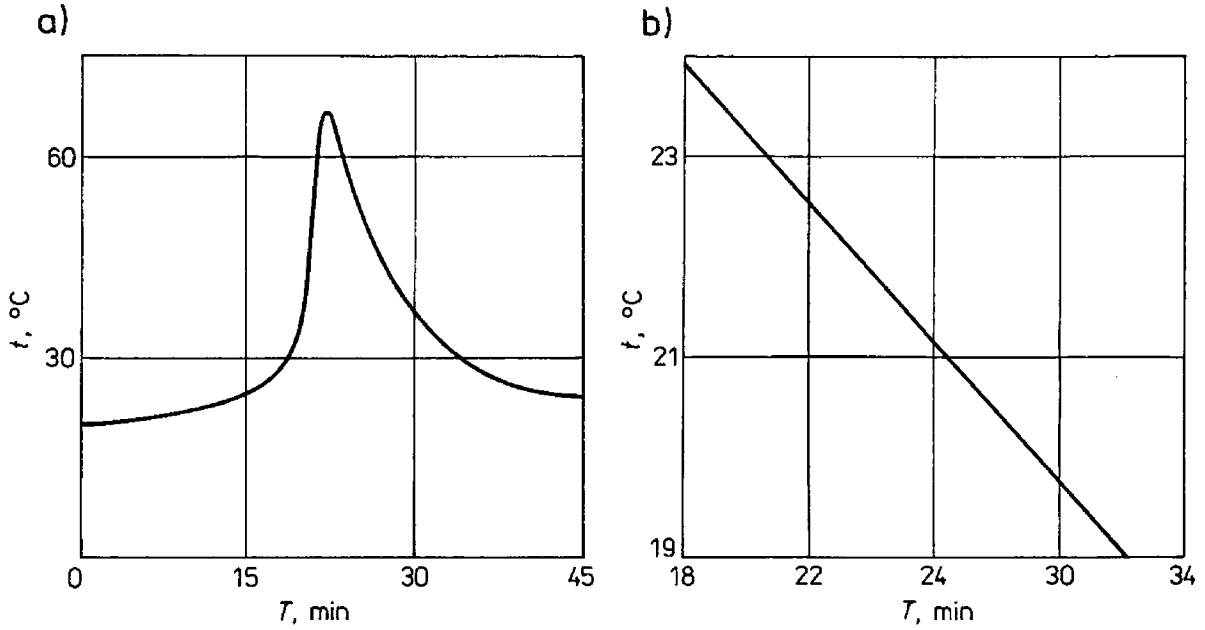
4.1.3. Formowanie polimeryzacyjne PMMA

Z kilku podstawowych technik polimeryzacji polimetakrylanu metylu (w masie, w suspensji, w emulsji i w roztworze) do formowania polimeryzacyjnego szczególnie przydatna jest technika polimeryzacji w masie (zwana też blokową). Proces polimeryzacji PMMA w masie można prowadzić jedno- lub dwuetapowo. W odmianie jednoetapowej materiał wejściowy stanowi mieszanina monomeru, którym jest ciekły metakrylan metylu, z inicjatorem polimeryzacji, najczęściej nadtlenkiem benzoilu, dodawanym w ilości $0{,}1 \div 1{,}0\%$ mas. w stosunku do monomeru. W odmianie dwuetapowej materiał wejściowy stanowi mieszanina wstępnie spolimeryzowanego metakrylanu metylu — prepolimeru — o konsystencji syropu z inicjatorem, jak w odmianie jednoetapowej. Prepolimer jest roztworem polimeru w monomerze zawierającym $5 \div 30\%$ polimeru. W jednej i drugiej odmianie do mieszaniny niekiedy wprowadza się także plastyfikator (ftalan butylowy) oraz środek barwiący.

W ogólnym ujęciu proces formowania polimeryzacyjnego PMMA polega na wlaniu do gniazda formującego formy sporządzonej uprzednio mieszaniny monomeru z inicjatorem bądź prepolimeru z inicjatorem, ewentualnie z innymi składnikami dodatkowymi. Bardzo często formę stanowią dwie szyby ze szkła technicznego, np. o wymiarach $1800 \times 1200 \times 10$ mm, z przekładkami dystansowymi i uszczelniającymi na bokach. Wypełnioną formę wprowadza się do komory lub tunelu grzejnego, gdzie

temperaturę podnosi się np. od 40 do 160°C z szybkością zależną przede wszystkim od stężenia inicjatora i wymiarów przedmiotu (głównie grubości). Proces polimeryzacji jest egzotermiczny (54,3 kJ/mol), a czas formowania stosunkowo długi, na ogół 24÷48 h, a nawet do 100 h. Najczęściej przedmiot jest ochładzany razem z formą. Jeżeli do mieszaniny wprowadzi się proszek metalu o bardzo dużym rozdrobnieniu; to można otrzymać przedmioty pochłaniające 95% promieniowania podczerwonego, ale przepuszczające promieniowanie widzialne [4.33], znajdujące zastosowanie przede wszystkim w urządzeniach klimatyzacyjnych. Formowanie polimeryzacyjne PMMA można prowadzić, analogicznie jak PUR i PA, techniką RIM [4.113].

Specyficzną odmianą formowania polimeryzacyjnego PMMA jest otrzymywanie warstwy tworzywa na powierzchni metali jako replik dla odwzorowywania struktury geometrycznej powierzchni do oceny zużycia elementów maszyn [4.35]. Do tego celu można stosować dwuskładnikowe tworzywo dentystyczne o nazwie Duracryl czechosłowackiej firmy Sopfa. Najwyższa temperatura polimeryzacji tego PMMA nie jest wysoka (rys. 4.9a), a ze wzrostem temperatury (w obrębie temperatury pokojowej) polimeryzacja przebiega szybciej (rys. 4.9b).



Rys. 4.9. Zależność temperatury t polimeryzacji (a) oraz temperatury t tworzywa (b) od czasu T zestalania w przypadku dwuskładnikowego PMMA o nazwie Duracryl; próbki miały kształt krążków o wysokości 4 mm i średnicy 25 mm [4.35]

4.2. Nanoszenie

Tworzywa można nanosić trwale na powierzchnie innych materiałów, np. metali, otrzymując z nich powłoki ochronne i dekoracyjne, zaliczane do powłok organicznych. Podczas nanoszenia (powlekania, nakładania) powłokotwórcze tworzywo wejściowe może być w stanie stałym (w postaci proszku), plastycznym lub ciekłym. W każdym jednak przypadku, aby wytworzyć niezbędną adhezję pomiędzy tworzy-

wem a materiałem, na który się je nanosi, co jest podstawowym warunkiem uzyskania użytecznej powłoki, tworzywo musi zostać przeprowadzone w stan ciekły, ewentualnie plastyczny, umożliwiający zwilżanie powierzchni materiału i następnie adsorpcję, a sama warstwa wierzchnia materiału odpowiednio przygotowana. Nanoszeniu jest poświęcona bogata literatura. W Polsce duży wkład w upowszechnienie i rozwój nanoszenia wniosły prace Z. Kowalskiego [4.43], T. Drążkiewicza i J. Raczyńskiej [4.23] oraz inne, głównie z Instytutu Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie.

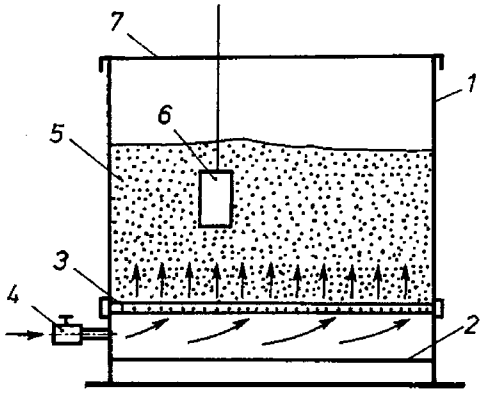
Znanych jest kilka odmian nanoszenia, z których duże znaczenie mają następujące odmiany: nanoszenie fluidyzacyjne, nanoszenie elektrocieplne, nanoszenie (natryskiwanie) płomieniowe, nanoszenie polewające, nanoszenie natryskowe i nanoszenie zanurzeniowe. Do nanoszenia tworzyw nie zalicza się umownie wytwarzania powłok sposobami malarskimi — malowania pędzlem i wałkiem, malowania natryskiem pneumatycznym, malowania hydrodynamicznego itd., opisanego w literaturze [4.75], oraz wytwarzania łatwo zdzieralnych powłok ochrony czasowej [4.67], jak również wytwarzania powłok do celów specyficznych, np. stosowanych w procesach obróbki cieplnej metali [4.55].

Tworzywo wejściowe do nanoszenia w stanie plastycznym bądź w stanach plastycznym i ciekłym występuje w postaci pasty, układu dyspersyjnego (dyspersji) lub roztworu. W przypadku PVC pasta nosi nazwę *plastizolu*, a w szczególnym przypadku *organozolu* — plastizolu z dużą ilością lotnych rozpuszczalników [4.23].

4.2.1. Nanoszenie fluidyzacyjne

Fluidyzacyjne nanoszenie powłoki z tworzywa polega na wytworzeniu zawiesiny sproszkowanego tworzywa w strumieniu gazu płynącego do góry — złoża fluidalnego, i wprowadzeniu do niego przedmiotu uprzednio nagrzanego nieco powyżej temperatury topnienia tworzywa, odczekaniu określonego czasu, wyjęciu przedmiotu ze złoża i często ponownym nagrzaniu go oraz następnie ochłodzeniu. W czasie przebywania przedmiotu w złożu cząstki tworzywa stykają się z przedmiotem i stapiają, tworząc powłokę związaną adhezyjnie z materiałem przedmiotu.

Nanoszenie fluidyzacyjne przeprowadza się we *fluidyzatorze* (rys. 4.10). Typowy fluidyzator składa się z pojemnika (*1*), w którym znajduje się stosunkowo nieduża



Rys. 4.10. Schemat fluidyzatora: *1* — pojemnik, *2* — dno lite, *3* — dno porowate, *4* — zawór, *5* — złoże fluidalne, *6* — przedmiot, na który nanosi się tworzywo, *7* — pokrywa

ilość tworzywa w postaci proszku z ziarnami o rozmiarach od 50 do 250 μm, mającego podwójne dno: lite (*2*) i porowate (*3*), poprzez które doprowadza się do pojemnika pod małym ciśnieniem gaz. Ciśnienie i ilość gazu regulowane są zaworem (*4*). Powstaje w ten sposób *złoże fluidalne* [4.12]. Jako *gaz fluidyzujący* stosuje się najczęściej powietrze, w niektórych jednak przypadkach nanoszenia powłok z tworzyw stosunkowo łatwo ulegających utlenianiu można używać azotu lub dwutlenku węgla.

Złoże fluidalne powstaje wtedy, gdy siła ciężkości P_1 proszku tworzywa zrówna się z siłą parcia P_2 gazu na jego powierzchnię. Siły te wyraża się wzorami [4.73]

$$P_1 = (\rho_{cz} - \rho)\, g\, A\, h\, (1 - \varepsilon) \tag{4.8}$$

oraz

$$P_2 = A\,\Delta p = f\, A \frac{h}{d_z} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} v_0^2\, \rho \tag{4.9}$$

w których A oznacza pole powierzchni przekroju poprzecznego fluidyzatora, ρ_{cz} oraz ρ — gęstość odpowiednio cząstek tworzywa i gazu, h — wysokość nasypanego proszku tworzywa we fluidyzatorze, v_0 — prędkość przepływu gazu odniesioną do pustego fluidyzatora, g — przyspieszenie ziemskie. Poza tym we wzorach tych ε oznacza porowatość nasypanego proszku tworzywa, definiowaną jako iloraz różnicy objętości nasypanego proszku i objętości całkowitej cząstek do objętości całkowitej cząstek, co sprowadza się do równania

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{n\,cz}}{\rho_{cz}} \tag{4.10}$$

w którym $\rho_{n\,cz}$ oznacza gęstość nasypową cząstek tworzywa. Natomiast we wzorze (4.9) symbol d_z oznacza średnicę zastępczą cząstki, określaną jako średnicę kuli o tej samej objętości V_{cz} co cząstka

$$V_{cz} = V_{kuli} = \frac{\pi d_z^3}{6} \tag{4.11}$$

zatem

$$d_z = \sqrt[3]{\frac{6\,V_{cz}}{\pi}} \tag{4.12}$$

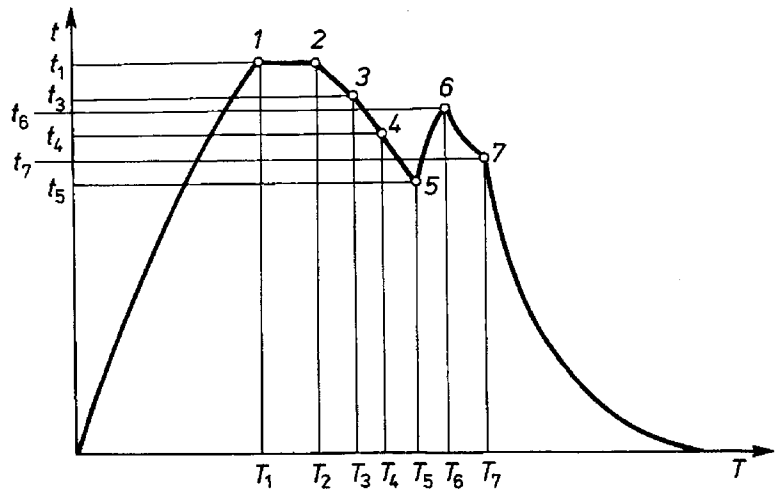
I wreszcie symbol f oznacza współczynnik oporu według równania Erguna, związany z liczbą Reynoldsa. Przyrównując do siebie zależności (4.8) i (4.9) oraz wstawiając wyrażenie matematyczne na f podane w literaturze [4.73], otrzymuje się równanie kwadratowe względem prędkości v_0. Z równania tego można wyznaczyć prędkość v_{0G} gazu o lepkości η, niezbędną do zapoczątkowania powstania złoża fluidalnego

$$\frac{150\, v_{0G}\, \eta\, (1-\varepsilon)}{g\, \rho\, d_z^2\, \varepsilon^3} + \frac{1{,}75\, v_{0G}^2}{g\, d_z\, \varepsilon^3} = \frac{\rho_{cz} - \rho}{\rho} \tag{4.13}$$

Gdy prędkość gazu jest większa od v_{0G}, wówczas następuje rozluźnienie kontaktu między poszczególnymi cząstkami. Każda cząstka zachowuje się niezależnie, wznosząc się do góry i opadając z powrotem w dół, i wartość ε rośnie, przybierając wartość ε_f ($\varepsilon_f > \varepsilon$). Przyjmuje się, że ε wynosi około 0,4.

W celu zapewnienia jednorodnej powłoki o dobrej jakości, na ogół przedmiot, po wyprowadzeniu z fluidyzatora, powtórnie nagrzewa się w podobnej komorze lub

tunelu grzejnym do temperatury zbliżonej do temperatury topnienia tworzywa. Proces nanoszenia fluidyzacyjnego kończy wyjęcie przedmiotu z komory lub tunelu i ochłodzenie go. Na rysunku 4.11 przedstawiono zależność temperatury przedmiotu od czasu trwania procesu.



Rys. 4.11. Zależność temperatury t przedmiotu od czasu T poszczególnych zabiegów podczas nanoszenia fluidyzacyjnego: *1* — zakończenie nagrzewania przedmiotu, *2* — wyjęcie przedmiotu z tunelu lub komory grzejnej, *3* — wprowadzenie przedmiotu do fluidyzatora, *4* — wyprowadzenie przedmiotu z fluidyzatora, *5* — wprowadzenie przedmiotu do tunelu lub komory grzejnej, *6* — wyjęcie przedmiotu z tunelu lub komory grzejnej, *7* — zakończenie ostatecznego stapiania powłoki, początek ochładzania przedmiotu z naniesioną powłoką

Na proces nanoszenia fluidyzacyjnego wpływają następujące ważniejsze czynniki:

a) właściwości przedmiotu: temperatura nagrzania, ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła, gęstość, kształt i wymiary, stan warstwy wierzchniej, zwłaszcza powierzchni;

b) właściwości tworzywa: temperatura topnienia, ciepło właściwe, współczynnik przewodzenia ciepła, gęstość, kształt i wymiary cząstek;

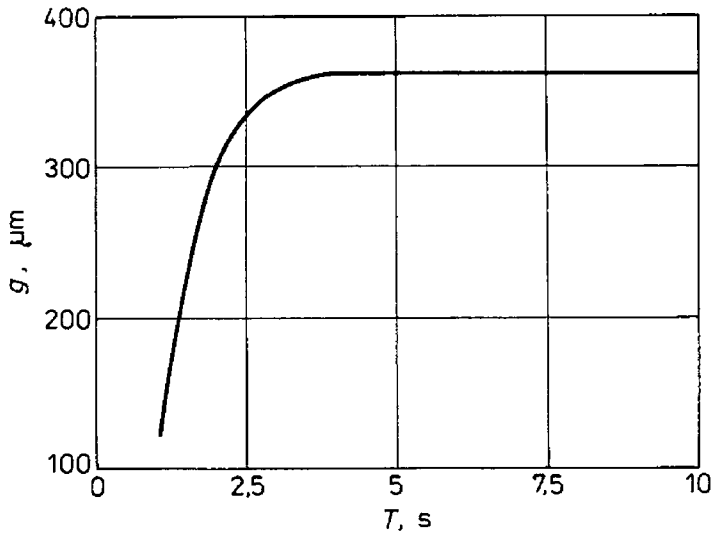
c) właściwości dna porowatego: kształt i wymiary porów, równomierność rozmieszczenia porów, stan powierzchni porów;

d) właściwości gazu: gęstość, lepkość, prędkość przepływu, temperatura, wilgotność;

e) technika nanoszenia: czas przetrzymania przedmiotu w złożu, czyli czas nanoszenia, temperatura otoczenia, ruchy przedmiotu w złożu.

Większość tych czynników jest ustalona dla danego rodzaju materiału przedmiotu, sposobu przygotowania powierzchni i rodzaju użytego tworzywa, jak również rozwiązania konstrukcyjnego przedmiotu. Niektóre czynniki są zdeterminowane cechami konstrukcyjnymi fluidyzatora oraz urządzeń z nim współpracujących. Do czynników dobieranych — *parametrów nanoszenia* zalicza się głównie [4.106] temperaturę przedmiotu w momencie wprowadzania do złoża i temperaturę gazu oraz czas nanoszenia. Temperatura przedmiotu, jak już wspomniano, musi być nieco wyższa o temperatury topnienia tworzywa i zależy głównie od właściwości cieplnych

i rozwiązania konstrukcyjnego przedmiotu. Zbyt niska temperatura przy nanoszeniu PA powoduje tworzenie się sferolitów o różnych rozmiarach [4.106]. Temperatura gazu zawiera się na ogół w granicach 20÷65°C i nie wpływa istotnie na strukturę i właściwości powłok. Czas nanoszenia ma zasadniczy wpływ na grubość powłoki, ale tylko do pewnej wartości, po której przekroczeniu zwiększenie czasu nie powoduje pogrubienia powłoki (rys. 4.12). Podczas nanoszenia fluidyzacyjnego zachodzi nie zamierzone elektryzowanie się cząstek tworzywa [4.28], co zakłóca proces m.in. poprzez tworzenie się aglomeratów cząstek oraz przywieranie cząstek do ścian fluidyzatora.



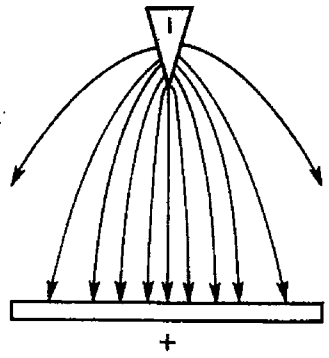
Rys. 4.12. Zależność grubości g powłoki z PA 6 (Tarnamidu T-27) od czasu T nanoszenia; przedmiot — kulki stalowe o średnicy 12,4 mm z trzpieniem o średnicy 2,6 mm, nagrzane przed nanoszeniem do temperatury 320°C [4.71]

4.2.2. Nanoszenie elektrocieplne

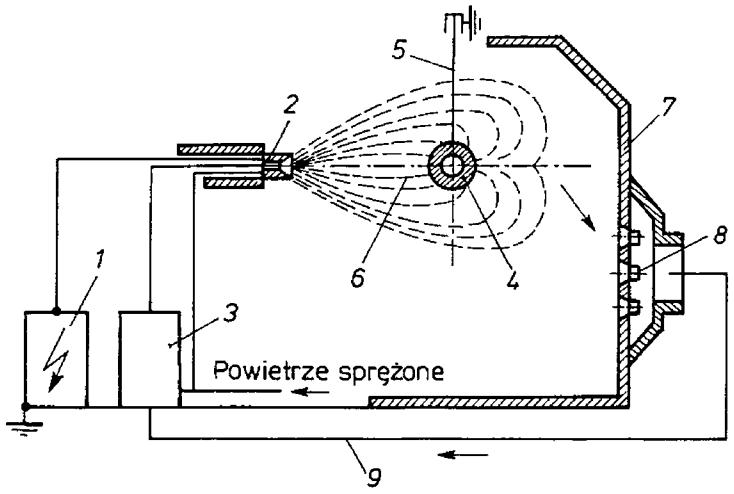
Podczas nanoszenia elektrocieplnego występują bezpośrednio po sobie dwa następujące etapy: formowanie wstępne powłoki w polu elektrycznym w różnych środowiskach i formowanie ostateczne powłoki w polu temperatury w powietrzu. Nanoszenie elektrocieplne dzieli się na nanoszenie elektrostatyczne, fluidyzacyjno-elektrostatyczne i elektroforetyczne.

Nanoszenie elektrostatyczne

Elektrostatyczne nanoszenie (napylanie) powłoki z tworzywa polega na przeniesieniu sproszkowanego tworzywa w polu elektrycznym prądu stałego w powietrzu, czyli w polu elektrostatycznym, z głowicy napylającej stanowiącej biegun ujemny na powierzchnię przedmiotu będącego biegunem dodatnim (rys. 4.13), następnie wyjęciu przedmiotu z pola elektrycznego, stopieniu cząstek tworzywa pod wpływem ciepła dostarczonego z zewnątrz, zestaleniu lub utwardzeniu tworzywa powłoki i ochłodzeniu przedmiotu z naniesioną powłoką. Nanoszenie elektrostatyczne przeprowadza się za pomocą urządzenia, które składa się z następujących podstawowych części (rys. 4.14): generatora wysokiego napięcia prądu stałego (*1*), głowicy napylającej (*2*),



Rys. 4.13. Linie sił pola elektrycznego

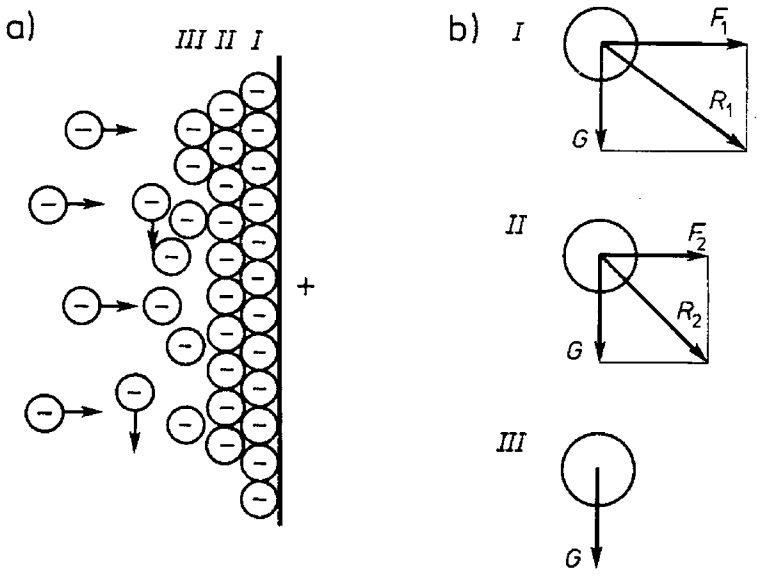


Rys. 4.14. Schemat urządzenia do nanoszenia elektrostatycznego tworzywa sproszkowanego: *1* — generator wysokiego napięcia prądu stałego, *2* — głowica napylająca, *3* — zbiornik na tworzywo, *4* — przedmiot, na który nanosi się powłokę (uziemiony), *5* — wieszak na przedmiot, *6* — pole elektryczne, *7* — obudowa kabiny, *8* — odciąg odpylający, *9* — przewód do odzyskanego proszku

zwanej też pistoletem napylającym, źródła sprężonego powietrza oraz zbiornika (*3*) na tworzywo powłokowe w postaci proszku o rozmiarach ziarn od 20 do 100 μm. Napięcie prądu doprowadzonego do głowicy (do 150 kV) i uziemienie przedmiotu powoduje powstanie pola elektrycznego.

W procesie nanoszenia elektrostatycznego następuje najpierw elektryzowanie cząstek tworzywa znajdującego się w głowicy napylającej. Elektryzowanie zachodzi pod wpływem kilku czynników: styku cząstek z materiałem głowicy i otaczającym zjonizowanym powietrzem, w wyniku polaryzacji cząstek oraz przez adsorpcję jonów wskutek dyfuzji i bombardowania [4.43]. Ruch cząstek w polu elektrycznym zachodzi najpierw pod wpływem sił pochodzących od sprężonego powietrza i następnie w zasadniczy już sposób pod wpływem sił elektrostatycznych. Cząstki osadzają się na przedmiocie na skutek przyciągania ich przez przeciwnie naładowane cząsteczki przedmiotu. Osadzanie trwa dopóty, dopóki siła przyciągania cząstek przez przedmiot nie zostanie zrównoważona przez sumę sił odpychających poszczególne ujemnie

naładowane cząstki (rys. 4.15). Dzięki ładunkowi elektrostatycznemu powłoka z napylonego proszku, uformowana wstępnie, utrzymuje się na przedmiocie przez długi czas.

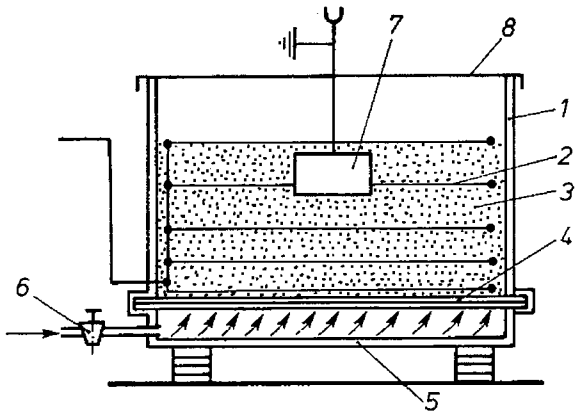


Rys. 4.15. Schematyczne przedstawienie tworzenia się warstwy zjonizowanych cząstek tworzywa na przedmiocie: a) układanie się cząstek na przedmiocie, b) siły działające na cząstki w położeniu *I*, *II* i *III*; G — siła ciężkości, F_1 i F_2 — siły elektrostatyczne

Przedmiot umieszcza się następnie w komorze lub tunelu grzejnym w temperaturze nieco przekraczającej temperaturę topnienia tworzywa, co powoduje stopienie proszku, jego adhezyjne łączenie z materiałem przedmiotu oraz ostateczne formowanie powłoki. Proces kończy wyjęcie przedmiotu z komory lub tunelu z naniesioną powłoką i ochłodzenie [4.72]. Najkorzystniejsze są tunele bądź komory z ogrzewaniem promiennikowym lub indukcyjnym, zapewniającym stapianie proszku w kierunku od powierzchni przedmiotu.

Nanoszenie fluidyzacyjno-elektrostatyczne

Łącząc nanoszenie fluidyzacyjne i elektrostatyczne w jeden proces otrzymuje się nanoszenie fluidyzacyjno-elektrostatyczne. Przeprowadza się je w zasadniczej części za pomocą *fluidyzatora elektrostatycznego*, zawierającego pojemnik (*1*) wykonany z materiału nieprzewodzącego prądu elektrycznego, w którym za pomocą elektrod (*2*) umieszczonych w złożu fluidalnym (*3*) następuje elektryzowanie cząstek tworzywa (rys. 4.16). Cząstki unoszą się w strumieniu gazu i dzięki ładunkowi elektrycznemu są przyciągane przez przedmiot zanurzony w złożu i uziemiony. Ciąg dalszy postępowania jest taki, jak w przypadku nanoszenia fluidyzacyjnego i elektrostatycznego. Do głównych zalet omawianego nanoszenia zalicza się efektywne nanoszenie powłok z tworzyw o małym napięciu powierzchniowym, np. z PTFE [4.61], wyeliminowanie nagrzewania przedmiotu przed wprowadzeniem do fluidyzatora oraz niewystępowanie strat proszku, natomiast do wad — nadmierne ukierunkowanie



Rys. 4.16. Schemat fluidyzatora elektrostatycznego: *1* — pojemnik, *2* — elektrody, *3* — złoże fluidalne, *4* — dno porowate, *5* — dno lite, *6* — zawór do gazu, *7* — przedmiot, na który nanosi się tworzywo, *8* — pokrywa

cząstek powodujące tworzenie się grubszych powłok na powierzchni przedmiotu zwróconej ku elektrodzie oraz trudności w uzyskaniu równomiernego pola elektrycznego w całym przekroju poprzecznym fluidyzatora.

Nanoszenie elektroforetyczne

Proces nanoszenia elektroforetycznego polega na osadzaniu na powierzchni przedmiotu cząstek tworzywa z wodnego układu dyspersyjnego (dyspersji wodnej — hydrozolu), organicznego układu dyspersyjnego (organodyspersji) lub z roztworu koloidalnego pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego, nagrzaniu przedmiotu ze wstępnie naniesioną powłoką poza polem elektrycznym w fazie ciekłej do temperatury nieco wyższej od temperatury topnienia tworzywa i następnie ochłodzeniu przedmiotu z naniesioną ostatecznie powłoką. W polu elektrycznym zachodzi ruch cząstek, czyli *elektroforeza*, w kierunku anody, co nosi nazwę *anaforezy*, lub w kierunku katody, co nazywa się *kataforezą*, w zależności od polarności elektrody — przedmiotu. Na powierzchni elektrody cząstki ulegają koagulacji wskutek kompensacji ładunku elektrycznego — w przypadku wodnego układu dyspersyjnego — jonami pochodzącymi głównie z elektrolizy wody [4.75]. Osadzona powłoka ma strukturę porowatą i zawiera znaczną ilość fazy ciekłej o ładunku przeciwnym. Pod wpływem prądu faza ciekła zawierająca kationy wędruje w kierunku katody (elektroosmoza), co powoduje, że powłoka ulega osuszeniu (zawiera 5÷10% fazy ciekłej) i łączy się adhezyjnie z powierzchnią przedmiotu; można przyjąć, że jest uformowana wstępnie. Po wyjęciu przedmiotu z fazy ciekłej powłokę suszy się i zestala w temperaturze zazwyczaj do 190°C w czasie do 30 minut, co powoduje jej uformowanie ostateczne.

Nanoszenie elektroforetyczne stosuje się szczególnie do otrzymywania powłok PTFE o grubości do 30 μm z wodnego układu dyspersyjnego polimeru [4.70, 4.78] oraz do powłok PVC [4.58, 4.60] o grubości do 200 μm z organicznego układu

dyspersyjnego. W tablicy 4.2 zestawiono przykładowo skład i właściwości organodyspersji PVC, parametry procesu nanoszenia i właściwości powłoki.

Tablica 4.2

Charakterystyka procesu nakładania elektroforetycznego powłok z organodyspersji PVC (przykład) [4.32]

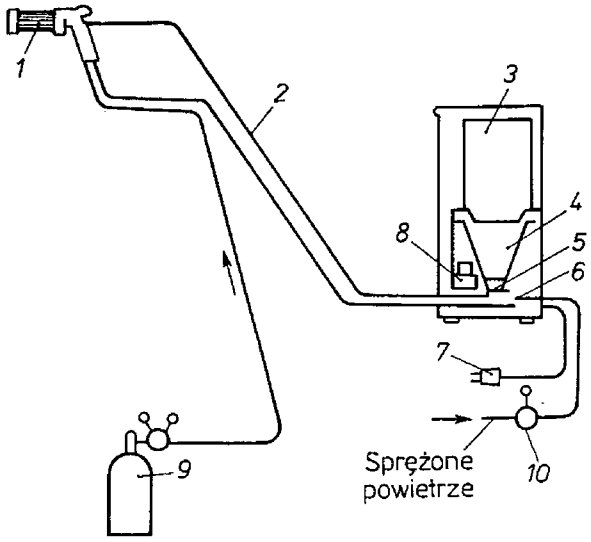
Czynnik, wielkość	Wartość
Skład organodyspersji, % — modyfikowany plastizol PVC — dyspergator: cykloheksanon — rozcieńczalnik: octan *n*-amylu	 20 40 40
Właściwości organodyspersji — lepkość dynamiczna, mPa · s — wgłębność krycia, %	 2,94 64
Parametry nanoszenia na stal — przygotowanie powierzchni: fosforanowanie — napięcie prądu, V — czas osadzania, min — temperatura formowania ostatecznego, °C — czas formowania ostatecznego, min	 170 6 12 25
Właściwości powłoki — grubość, μm — połysk — ścieralność, kg/μm	 31 3 2,45

4.2.3. Nanoszenie płomieniowe

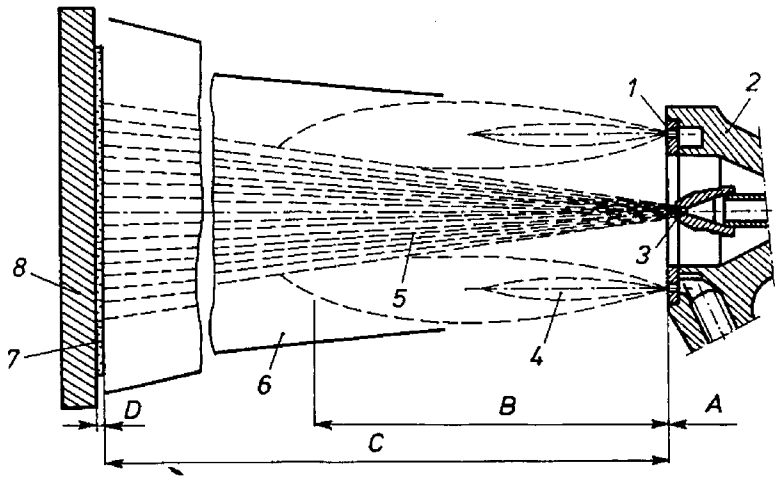
W procesie nanoszenia (natryskiwania) płomieniowego zachodzi jednocześnie: rozpylanie i przenoszenie tworzywa sproszkowanego, lub rzadziej w stanie plastycznym, w strumieniu gazu i ciepła z *pistoletu nanoszącego* (natryskowego) na powierzchnię przedmiotu, nagrzewanie warstwy powierzchniowej przedmiotu, stapianie tworzywa i łączenie adhezyjne z materiałem przedmiotu oraz kohezyjne ze sobą, a następnie zestalanie lub utwardzanie tworzywa i ochładzanie przedmiotu z naniesioną powłoką. Źródłem ciepła stapiającego tworzywo i nagrzewającego przedmiot jest płomień powstający podczas spalania gazu palnego. Nanoszenie płomieniowe jest najstarszą odmianą nanoszenia — zaczęto je stosować w latach 1931 ÷ 1932.

Nanoszenie płomieniowe wykonuje się za pomocą urządzenia, które składa się z następujących głównych części (rys. 4.17): pistoletu nanoszącego (natryskowego) (*1*), zbiornika (*3*) na tworzywo powłokowe, źródła sprężonego powietrza i źródła gazu palnego (*9*).

Na rysunku 4.18 przedstawiono schemat procesu nanoszenia płomieniowego. W procesie tym rozróżnić można następujące fazy [4.43]:



Rys. 4.17. Schemat urządzenia do nanoszenia płomieniowego: *1* — pistolet nanoszący, *2* — przewód doprowadzający tworzywo w strumieniu sprężonego powietrza, *3* — zbiornik tworzywa, *4* — lej, *5* — inżektor, *6* — dysza, *7* — włącznik elektryczny, *8* — wibrator ułatwiający zabieranie tworzywa, *9* — butla gazu palnego, *10* — reduktor



Rys. 4.18. Schemat procesu napylania płomieniowego: *A, B, C* i *D* — poszczególne fazy procesu zgodnie z tekstem, *1* — palnik pierścieniowy pistoletu, *2* — końcówka pistoletu, *3* — dysza rozpylająca pistoletu, *4* — płomień, *5* — strumień proszku tworzywa w mieszaninie powietrza i spalin, *6* — strumień spalin, *7* — powłoka, *8* — przedmiot

— *fazę mechaniczną A*, obejmującą podawanie zawiesiny cząstek tworzywa i sprężonego powietrza z zasobnika do dyszy rozpylającej pistoletu nanoszącego; ciśnienie powietrza wynosi 0,08 ÷ 0,15 MPa;

— *fazę cieplną B*, obejmującą stapianie cząstek tworzywa przede wszystkim w jego warstwie zewnętrznej i uplastycznianie we wnętrzu, co zachodzi na skutek spalania gazu palnego (na ogół acetylenu) w obecności tlenu zawartego w powietrzu, w palniku pierścieniowym pistoletu nanoszącego; temperatura spalin waha się w granicach 720 ÷ 1200°C, a największa występuje w odległości 50 ÷ 60 mm od pistoletu, natomiast temperatura płomienia acetylenowo-powietrznego sięga 2100°C;

— *fazę lotu C*, w której cząstkom tworzywa nadaje się przyspieszenie i rozpyla się je za pomocą strumienia mieszaniny rozprężającego się powietrza i spalin, trwającą, przy cząstkach o średnicy 50÷70 μm, od 0,0011 do 0,0024 s;

— *fazę łączenia D*, w której następuje łączenie adhezyjne stopionych z zewnątrz i uplastycznionych we wnętrzu cząstek tworzywa z nagrzanym materiałem przedmiotu, z jednocześnie przebiegającym łączeniem kohezyjnym cząstek w powłokę.

Ze względu na wady nanoszenia płomieniowego, zwłaszcza nieuchronne nierównomierne stapianie i uplastycznianie proszku, a nawet depolimeryzację niektórych cząstek, trudno jest uzyskać powłoki o dobrej jakości. Z tego powodu nanoszenie to jest wypierane głównie przez nanoszenie fluidyzacyjne, elektrostatyczne i zanurzeniowe.

4.2.4. Nanoszenie polewające

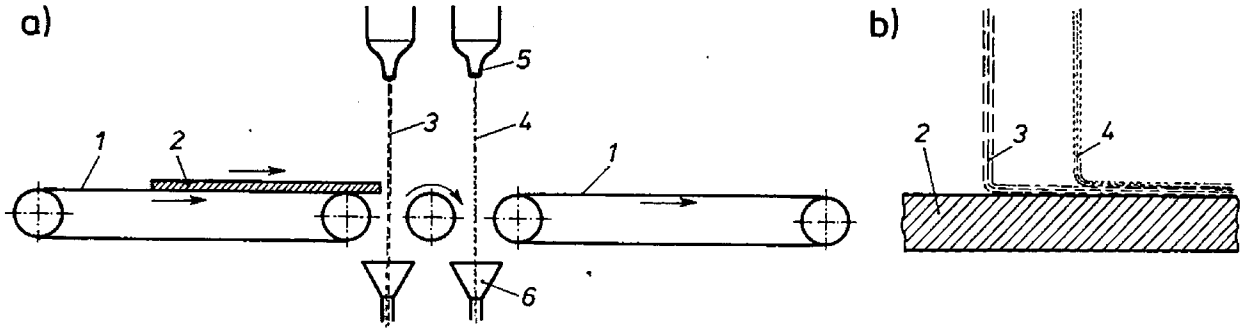
Cechami charakterystycznymi nanoszenia polewającego są: stan ciekły tworzywa wejściowego do procesu nanoszenia oraz ciągłość samego procesu, związana z nanoszeniem tworzywa na przedmioty o dużych rozmiarach lub na wstęgi. Nanoszenie to dzieli się na swobodne i wymuszone.

Nanoszenie swobodne

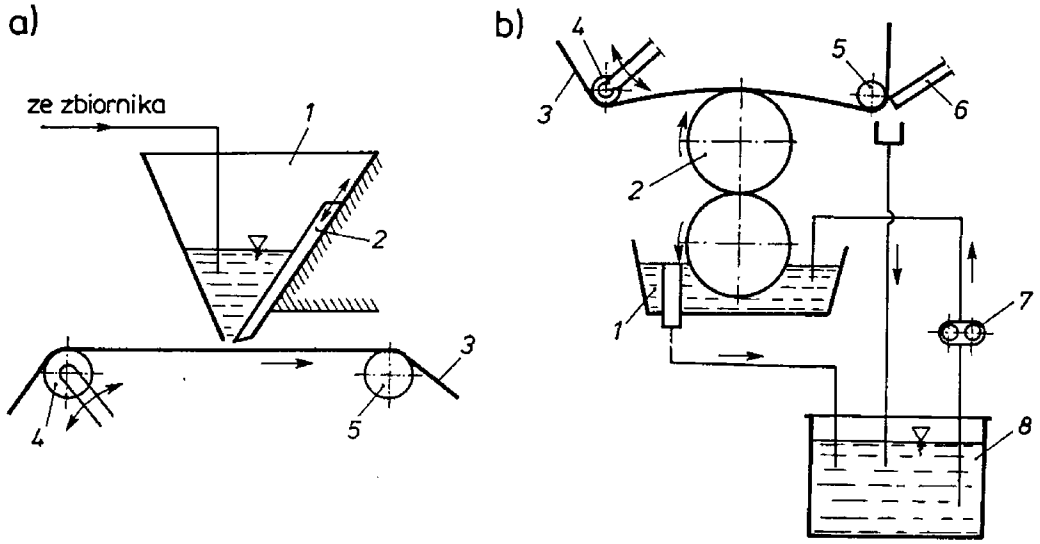
Istota nanoszenia swobodnego polega na bezpośrednim polewaniu ciekłym tworzywem przedmiotu o stosunkowo dużym polu powierzchni przeznaczonej do nanoszenia. Na ogół przedmiot umieszcza się na przenośniku taśmowym i przeprowadza przez płaski strumień spływającego swobodnie tworzywa prostopadle do powierzchni do nanoszenia, które w miarę przesuwania się przedmiotu pokrywa jego powierzchnię. Przedmiot może być nagrzany wstępnie, np. promiennikowo, a po naniesieniu tworzywa wprowadzany do tunelu grzejnego w celu zestalenia lub utwardzenia powłoki. Nanoszenie swobodne znalazło duże zastosowanie w nanoszeniu powłok poliestrowych na elementy mebli (rys. 4.19). W tym przypadku jeden strumień stanowi żywica poliestrowa modyfikowana, natomiast drugi — środki pomocnicze, lub środki pomocnicze są w dwóch strumieniach, jak np. w rozwiązaniu firmy Bürkle (Niemcy). Strumienie przepływają w obiegu zamkniętym w sposób ciągły w układach ze stale pracującymi pompami. Prędkość przedmiotu wynosi zazwyczaj 1÷3 m/s. Maszyny służące do polewającego nanoszenia swobodnego noszą nazwę *polewarek*.

Nanoszenie wymuszone

Wymuszanie nanoszenia może być powodowane różnymi czynnikami konstrukcyjnymi i technologicznymi, z różnym stopniem wymuszenia. Na przykład konstrukcyjnym czynnikiem wymuszającym może być listwa (rys. 4.20a) i wówczas stopień wymuszenia jest mały, bądź może być układ walców prostych, np. dwóch, jak na rys. 4.20b, powodujący już większy stopień wymuszenia. Nanoszenie wymuszone stosuje się do wstęg tkaniny, tworzywa (folii), papieru lub metalu, a maszyny służące do nanoszenia nazywają się odpowiednio *nanoszarką listwową* i *nanoszarką dwuwalcową*. W przypadku, gdy zachodzi konieczność jednoczesnego przesycania wstęgi



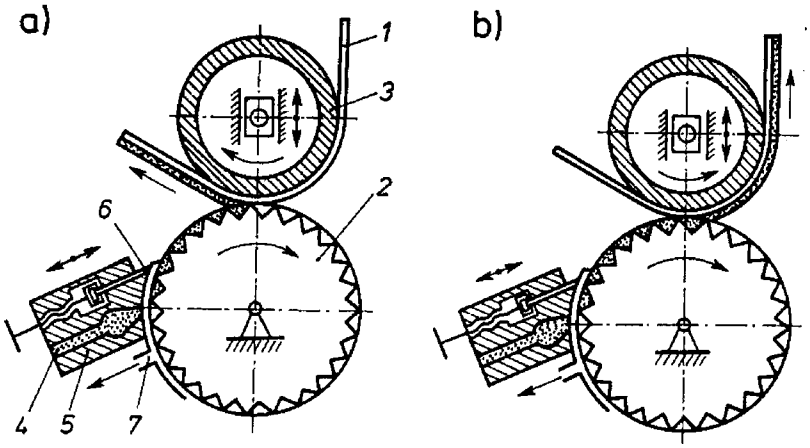
Rys. 4.19. Proces nanoszenia swobodnego: a) schemat ogólny, b) fragment, c) wygląd ogólny polewarki; *1* — przenośniki taśmowe, *2* — przedmiot do nanoszenia, *3* — strumień modyfikowanej żywicy poliestrowej, *4* — strumień środków pomocniczych, *5* — dysze szczelinowe, *6* — leje odbierające



Rys. 4.20. Schemat procesu nanoszenia wymuszonego listwowego (a) oraz dwuwalcowego (b): *1* — wanna tworzywa ciekłego, *2* — listwa nanosząca lub walec nanoszący, *3* — wstęga, na którą nanosi się tworzywo, *4* — wałek podający, *5* — wałek odbierający, *6* — listwa zgarniająca nadmiar tworzywa, *7* — pompa zębata, *8* — zbiornik tworzywa

(impregnowania), w nanoszarce walcowej walec stykający się ze wstęgą (nanoszący) ma większą prędkość obwodową niż prędkość liniowa wstęgi, a nawet może obracać się w przeciwnym kierunku. Wstęga może też stykać się z tworzywem poprzez jej wprowadzanie w szczelinę międzywalcową.

Nanoszenie dwuwalcowe bywa rozwiązywane zupełnie inaczej. Na przykład wstęga (*1*) może być wprowadzana między walce, z których jeden — nanoszący — ma rowki wzdłużne (*2*), a drugi — dociskowy — elastomerową warstwę powierzchniową (*3*) (rys. 4.21). Układ walców może być współbieżny (rys. 4.21a) i przeciwbieżny (rys. 4.21b), ale w obu przypadkach ciekłe tworzywo (*4*) jest doprowadzane pod małym ciśnieniem do głowicy (*5*) i dalej zapełnia rowki walca. Głowica ma także listwę zgarniającą (*6*) nadmiar tworzywa, jak również szczelinę wzdłużną (*7*) do odsysania z rowków powietrza. Oznaczając prędkość obwodową walca nanoszącego przez v_n,



Rys. 4.21. Schemat procesu nanoszenia wymuszonego dwuwalcowego: a) w układzie współbieżnym, b) w układzie przeciwbieżnym; oznaczenia w tekście [4.94]

a prędkość liniową wstęgi v_t ($v_n \geqslant v_t$), grubość h w μm warstwy ciekłego tworzywa naniesionej na wstęgę określają następujące zależności doświadczalne:

— przy nanoszeniu w układzie współbieżnym

$$h = 148{,}15 - 4{,}9\,N + 21\,\frac{v_n}{v_t} \tag{4.14}$$

— przy nanoszeniu w układzie przeciwbieżnym

$$h = 133{,}33 - 2{,}79\,N - 7{,}73\,\frac{v_n}{v_t} \tag{4.15}$$

przy czym N oznacza liczbę linii ciekłego tworzywa naniesioną na jednostkę długości wstęgi — „liniaturę" ($h = 18 \div 160$ μm, $N = 7 \div 33$).

4.2.5. Nanoszenie natryskowe

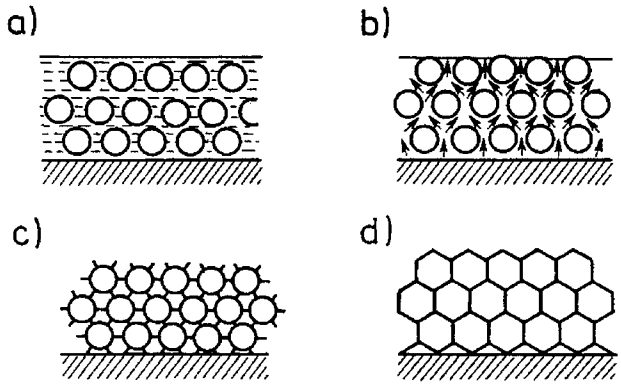
Nanoszenie poprzez natryskiwanie tworzyw w stanie ciekłym znalazło szczególne zastosowanie w odniesieniu do wodnych układów dyspersyjnych (dyspersji wodnych — hydrozoli). Proces formowania wstępnego powłoki z wodnych układów dyspersyjnych polimerów obejmuje, z pewnym uproszczeniem, następujące fazy (rys. 4.22):

a) cząstki polimeru o rozmiarach $0{,}1 \div 5$ μm są zazwyczaj otoczone błonką koloidu ochronnego lub emulgatora i rozdzielone wodą; w pierwszej fazie tworzenia się powłoki woda odparowuje;

b) cząstki zbliżają się do siebie, ale pozostają w dalszym ciągu rozdzielone wodą;

c) odległości pomiędzy cząstkami zmniejszają się do wymiarów kapilarnych;

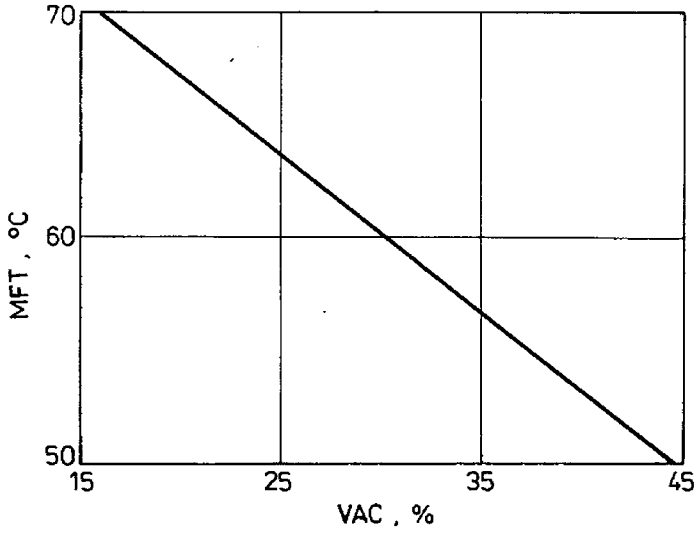
d) w wyniku działania sił kapilarnych cząstki zbliżają się nadal i dążą do ściślejszego upakowania, wypierając wodę z koloidem ochronnym i emulgatorem, powierzchnie



Rys. 4.22. Fazy formowania wstępnego powłoki z wodnych dyspersji polimerów: oznaczenia w tekście [4.34, 4.43]

styku cząstek ze sobą i materiałem przedmiotu powiększają się, rośnie adhezja, a falista powierzchnia powłoki ulega wygładzaniu.

Opisany proces dla danego wodnego układu dyspersyjnego zależy głównie od temperatury. Za najniższą temperaturę formowania wstępnego powłoki MFT (ang. *Minimum Film Temperature*) przyjmuje się temperaturę, w której dany wodny układ dyspersyjny ma zdolność do tworzenia powłoki jednolitej (rys. 4.23). Łączenie się



Rys. 4.23. Zależność najniższej temperatury formowania wstępnego powłoki MFT od zawartości octanu winylu VAC w kopolimerze chlorku winylu z octanem winylu [4.34]

cząstek w powłokę można opisać zależnością [4.34]

$$\theta = \frac{3\gamma T}{2\pi\eta r} \tag{4.16}$$

w której θ oznacza połowę kąta styku pomiędzy dwoma sąsiednimi cząstkami, γ — napięcie powierzchniowe na granicy polimer–powietrze, T — czas procesu, η — lepkość dynamiczną polimeru, r — promień cząstki. Warunkiem koalescencji cząstek jest spełnianie nierówności

$$G < 35\,\frac{\gamma}{r} \tag{4.17}$$

gdzie G oznacza współczynnik sprężystości postaciowej (poprzecznej).

Wodny układ dyspersyjny nanosi się na przedmiot, z odpowiednio przygotowaną powierzchnią, głównie poprzez natryskiwanie za pomocą pistoletów pneumatycznych z dyszą o średnicy 0,4÷0,6 mm, stosując ciśnienie powietrza 0,15÷0,20 MPa. Często po przygotowaniu powierzchni najpierw nanosi się międzywarstwę, a dopiero później powłokę z tworzywa, jedno- lub wielokrotnie w zależności od potrzeb. Jako międzywarstwę stosuje się powłokę metalową o grubości 25÷50 μm, z materiałów ceramicznych o grubości do 200 μm lub emalii.

Formowanie ostateczne powłoki polega na jej suszeniu na ogół przy nagrzewaniu promiennikowym i następnie na nagrzaniu przedmiotu z wysuszoną powłoką do temperatury powodującej topnienie tworzywa, co ostatecznie konstytuuje adhezję do materiału przedmiotu i kohezję powłoki. Nanoszenie natryskowe stosuje się przede wszystkim do wodnych układów dyspersyjnych PTFE i kopolimeru VC/VAC. W tablicy 4.3 zestawiono niektóre dane charakteryzujące formowanie ostateczne powłoki PTFE.

Tablica 4.3

Niektóre dane charakteryzujące formowanie ostateczne powłoki z hydrozolu PTFE [4.32]

Czynnik	Teflon*)	Fluon**)
Grubość powłoki, μm		
— podkładowej	6	13
— wierzchniej	25÷30	13÷17
Temperatura nagrzewania, °C	360÷400	360÷380
Czas nagrzewania przy jednej warstwie powłoki, min	18÷22	10÷15
Zalecana grubość w μm do uzyskania właściwości:		
— przeciwprzyczepnych	17÷58	80÷90
— antykorozyjnych	150÷200	—

*) PTFE produkcji firmy Du Pont (USA).

**) PTFE produkcji firmy ICI (Wielka Brytania).

4.2.6. Nanoszenie zanurzeniowe

Proces nanoszenia zanurzeniowego polega na zanurzeniu przedmiotu w tworzywie będącym w stanie ciekłym lub plastycznym, odczekaniu określonego czasu, wynurzeniu przedmiotu i następnie zestaleniu bądź utwardzeniu tworzywa powłoki. W czasie przebywania przedmiotu w tworzywie przywiera ono adhezyjnie do uprzednio przygotowanej jego powierzchni oraz tworzy powłokę.

Nanoszenie zanurzeniowe stosuje się w dużej mierze do wytwarzania powłok na elementach o dużych rozmiarach z PVC w postaci plastizolu. Plastizol PVC odznacza się małą adhezją do wielu materiałów, dlatego najpierw nanosi się międzywarstwę o dobrej adhezji zarówno do materiału przedmiotu, jak i plastizolu PVC, często również zanurzeniowo. Po wysuszeniu międzywarstwy przedmiot można przed procesem zanurzenia nagrzać, co przede wszystkim powiększa grubość powłoki formowanej wstępnie. Prędkość zanurzania wynosi 200÷1500 mm/min, wynurzania

zaś 100÷600 mm/min [4.23], ale obie prędkości mogą być mniejsze [4.43]. Czas przebywania przedmiotu w plastizolu PVC wynosi przeciętnie 15÷60 s. Powłoka formowana wstępnie jest charakteryzowana m.in. grubością (do 0,8÷1,5 mm) i masą odniesioną do jednostki jej pola powierzchni (masą jednostkową) m_j, która zależy głównie od prędkości V_w w cm/min wynurzaniá [4.59]

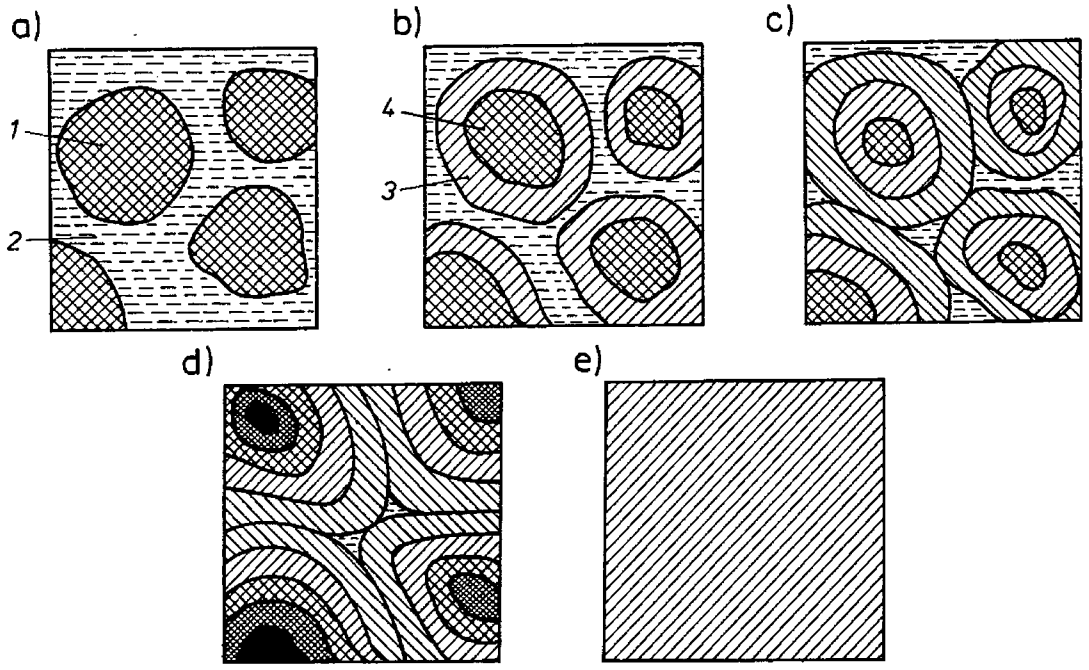
$$m_j = a\, V_w^{-b} \tag{4.18}$$

i lepkości η w cPa · s plastizolu

$$m_j = \alpha\, \eta + \beta \tag{4.19}$$

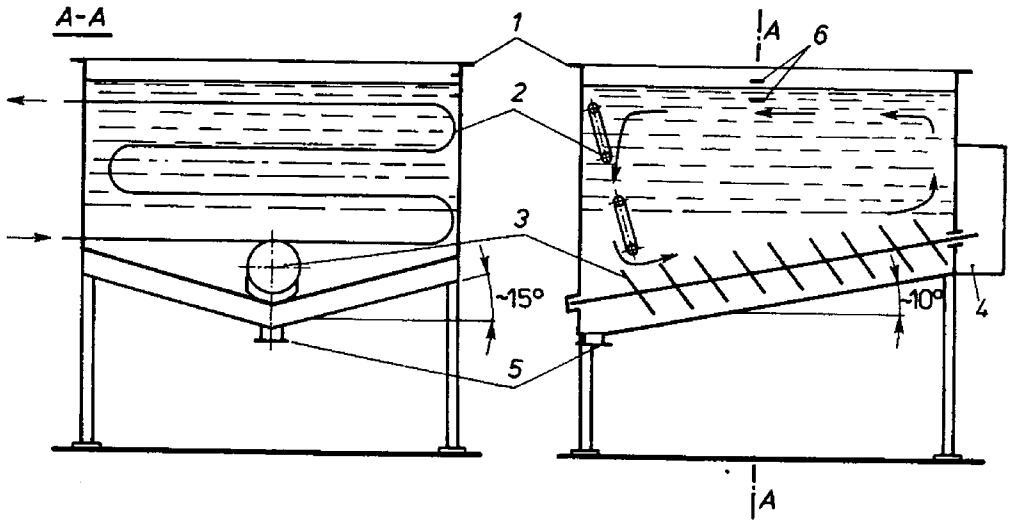
gdzie stałe a oraz b zależą przede wszystkim od rodzaju plastizolu i przyjmować mogą wartości $a = 6 \div 100$, $b = 0{,}32 \div 0{,}74$, natomiast stałe α i β zależą od V_w, np. dla $V_w = 12{,}7$ cm/min stała $\alpha = 0{,}001376$ oraz $\beta = 0{,}803$. Dla tych wartości $m_j = 0{,}5 \div 44$ kg/m^2.

Aby otrzymać ostatecznie uformowaną powłokę, należy najpierw przeprowadzić żelowanie plastizolu PVC tworzącego powłokę uformowaną wstępnie. Żelowanie jest procesem fizycznym zachodzącym w układzie polimer PVC–plastyfikator, w temperaturze 180÷190°C w czasie 30÷60 min, obejmującym solwatację — stopniowe przenikanie plastyfikatora w głąb cząstek polimeru i ich pęcznienie (rys. 4.24). Podczas ochładzania następuje ustalenie adhezji i zestalenie jednolitej powłoki.



Rys. 4.24. Schematyczne przedstawienie procesu żelowania plastizolu PVC: a) cząstki PVC zawieszone swobodnie w plastyfikatorze, b) początek przenikania plastyfikatora w cząstki, c) i d) stopniowe pęcznienie cząstek wskutek przenikania plastyfikatora, e) zanik poszczególnych cząstek i utworzenie jednolitego ciała stałego; *1* — pierwotne cząstki PVC, *2* — plastyfikator, *3* — część cząstek PVC, do której przeniknął plastyfikator, *4* — część cząstek PVC bez solwatacji [4.23, 4.43]

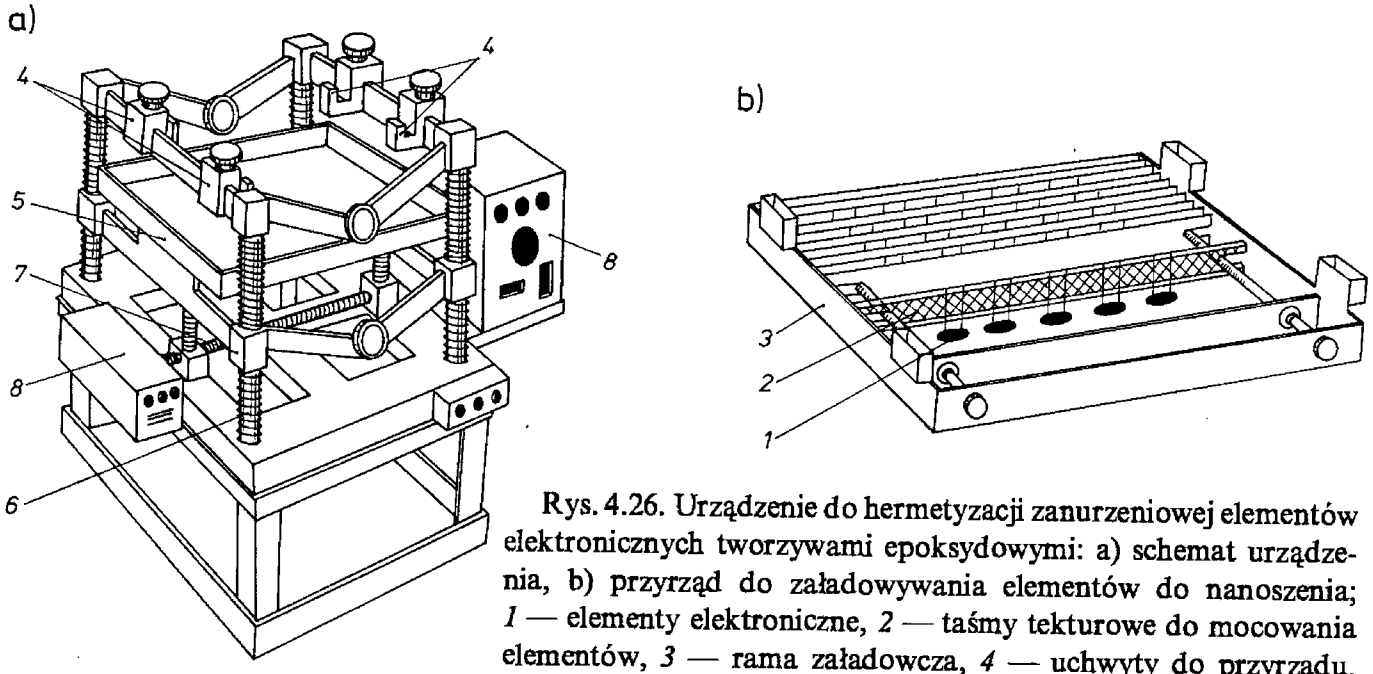
Formowanie wstępne powłoki odbywa się za pomocą urządzeń składających się z (rys. 4.25): wanny (*1*) napełnionej plastizolem PVC, wężownicy (*2*) z wodą chłodzącą,



Rys. 4.25. Schemat urządzenia do formowania wstępnego powłok z plastizoli PVC poprzez nanoszenie zanurzeniowe: *1* — wanna, *2* — wężownica, *3* — mieszadło ślimakowe, *4* — układ napędowy mieszadła, *5* — zawór spustowy tworzywa, *6* — wskaźniki poziomu tworzywa w wannie

gdyż nagrzane przedmioty przenoszą dużo ciepła do plastizolu, mieszadła ślimakowego (*3*) do utrzymania jednakowej lepkości plastizolu (obroty w jednym kierunku) i do ułatwiania opróżniania wanny (obroty w przeciwnym kierunku), układu napędowego (*4*) mieszadła. Wannę można poddać drganiom o częstotliwości np. 50 Hz, co głównie polepsza adhezję tworzywa do materiału przedmiotu.

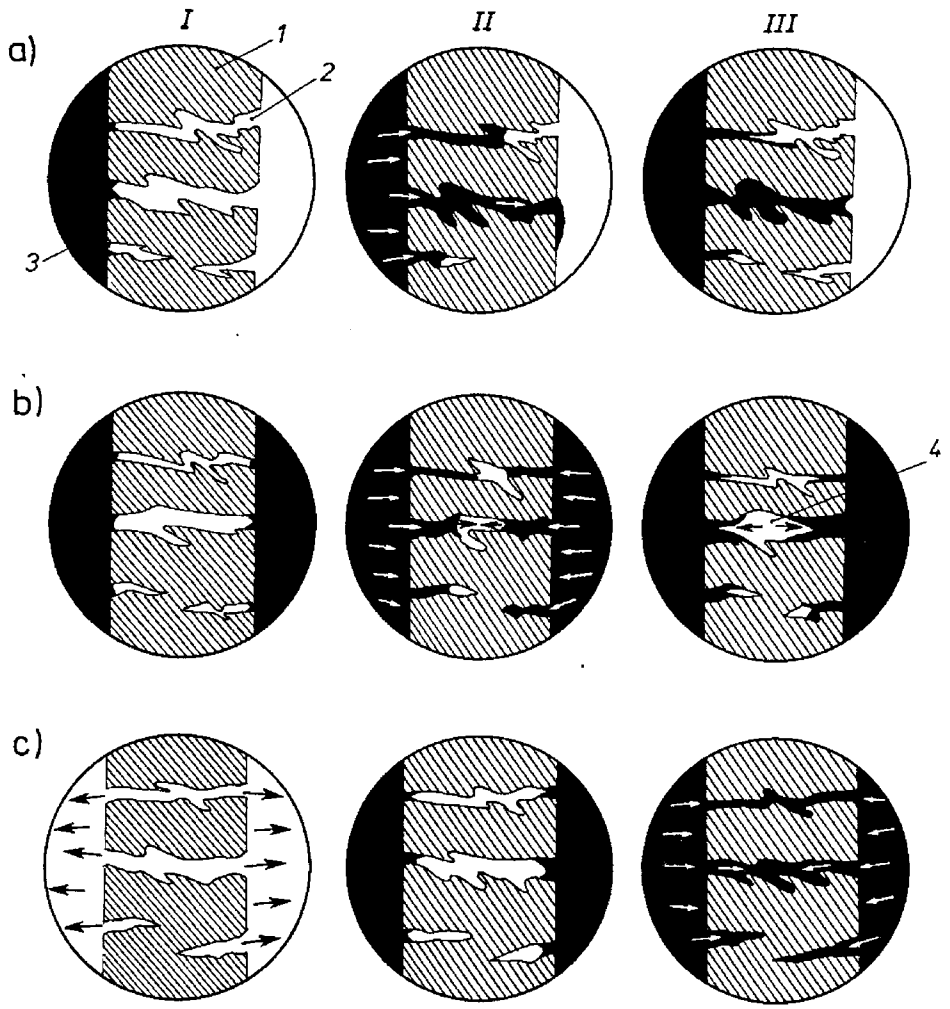
Duże zastosowanie znalazło nanoszenie zanurzeniowe do wytwarzania powłok na elementach elektronicznych. Traktowane jest ono w przemyśle elektronicznym jako jedna z metod hermetyzacji (obok prasowania — rozdz. 3, p. 3.3.2 i odlewania — rozdz. 3, p. 3.5.1). Do *hermetyzacji zanurzeniowej* stosuje się głównie tworzywa epoksydowe, fenolowe i silikonowe [4.80, 4.81]. Na rysunku 4.26 przedstawiono



Rys. 4.26. Urządzenie do hermetyzacji zanurzeniowej elementów elektronicznych tworzywami epoksydowymi: a) schemat urządzenia, b) przyrząd do załadowywania elementów do nanoszenia; *1* — elementy elektroniczne, *2* — taśmy tekturowe do mocowania elementów, *3* — rama załadowcza, *4* — uchwyty do przyrządu, *5* — wanna z tworzywem, *6* — śruby obrotowe, *7* — układ do podnoszenia i opuszczania wanny, *8* — układ sterowania i regulacji [4.80]

urządzenie do tej hermetyzacji z wanną napełnioną ciekłym tworzywem, wykonującą pionowy ruch postępowo-zwrotny, o wydajności kilkudziesięciu tysięcy elementów na godzinę.

Specyficzne jest stosowanie nanoszenia zanurzeniowego do uszczelniania odlewów [4.89, 4.107]. Z punktu widzenia procesu uszczelniania zanurzeniowego tworzywo musi odznaczać się małą lepkością (co wzmaga podgrzewanie tworzywa), aby mogło dostatecznie swobodnie wnikać w pory odlewu. Do *uszczelniania zanurzeniowego* stosuje się tworzywo o różnych składach, często patentowanych, ale duże znaczenie mają tworzywa, których podstawowym składnikiem są żywice epoksydowe, fenolowe, poliestrowe i silikony. Istota procesu polega na umieszczeniu odlewu uprzednio odpowiednio przygotowanego, korzystnie nagrzanego wstępnie, w komorze urządzenia do uszczelniania i wypełnieniu komory ciekłym tworzywem, z zastosowaniem podwyższonego ciśnienia (uszczelnianie ciśnieniowe), obniżonego ciśnienia (uszczelnianie próżniowe) i wreszcie najpierw obniżonego ciśnienia i następnie podwyższonego ciśnienia (uszczelnianie próżniowo-ciśnieniowe). W czasie działania tworzywa na odlew wnika ono w jego pory (rys. 4.27).



Rys. 4.27. Istota wnikania ciekłego tworzywa w pory odlewu w procesie uszczelniania zanurzeniowego: a) ciśnieniowego jednostronnego, b) ciśnieniowego dwustronnego, c) próżniowo-ciśnieniowego dwustronnego; *I* — etap początkowy, *II* — etap wnikania tworzywa w pory, *III* — etap po wypełnieniu porów (a) oraz (b), jak również końcowego wnikania (c), *1* — ścianka odlewu, *2* — pory odlewu, *3* — tworzywo, *4* — rozprężające się powietrze

Formowanie ostateczne powłok naniesionych zanurzeniowo odbywa się podobnie, jak w przedstawionych już odmianach nanoszenia.

4.3. Klejenie i kitowanie

Klej definiuje się jako substancję organiczną lub nieograniczną mającą właściwość trwałego łączenia materiałów. *Kit* jest również taką substancją mającą tę samą właściwość i dodatkowo odznaczającą się dużą lepkością, która jest przede wszystkim wynikiem znacznej ilości napełniacza proszkowego. *Klejeniem* nazywa się łączenie materiałów za pomocą kleju, natomiast *kitowaniem* określa się uzupełnianie ubytków materiału lub wypełnianie nierówności powierzchni materiału i usuwanie niektórych anomalii wytworów. Tak zdefiniowane kitowanie jest *kitowaniem konstrukcyjnym.*

Klejenie jest znane od tysiącleci, ale nabrało dużego znaczenia, gdy wprowadzono kleje organiczne sporządzane z polimerów i gdy zaczęto stosować klejenie metali oraz tworzyw wielkocząsteczkowych w celach konstrukcyjnych. Literatura dotycząca klejenia jest bardzo rozległa. Za pierwsze poważniejsze prace obejmujące klejenie przyjmuje się zgodnie monografie J. Delmonte'a z 1947 r. [4.20] oraz N.A. de Bruyne'a i R. Houwinka z 1951 r. [4.18], przetłumaczoną na język rosyjski (1954 r.) i niemiecki (1957 r.). W Polsce natomiast takimi pracami są książki wydane w 1961 r.: A. Siemaszki i S. Porejki [4.85] oraz H. Ptakowskiej-Wyżanowicz [4.76]. W literaturze na ogół najwięcej uwagi poświęca się opisowi klejów i technologii klejenia, nieco mniej postawom teoretycznym klejenia, a w małym stopniu przedstawia się problematykę konstrukcji połączeń i ich obliczeń, maszyn i przyrządów klejarskich, a także metod i oceny badań połączeń.

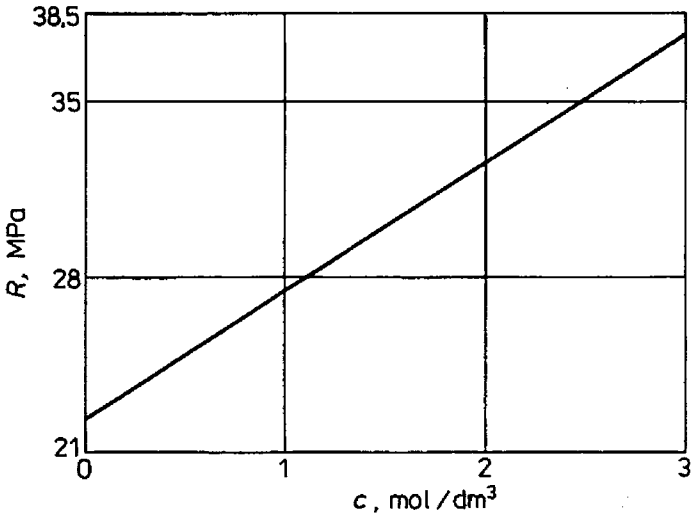
4.3.1. Podstawy procesów klejenia i kitowania

Do sporządzania klejów i kitów można używać tylko tych polimerów, które mają znaczną adhezję do materiałów łączonych i odpowiednią kohezję po utwardzeniu lub zestaleniu. Kleje i kity muszą odznaczać się małym napięciem powierzchniowym w chwili zwilżania powierzchni materiału. Klejalność i kitowalność zwiększa też obecność w kleju lub kicie grup silnie polarnych, np. w polimerach fenolowych i epoksydowych takimi grupami są grupy —OH (rys. 4.28), w mocznikowych i melaminowych =CO i —NH_2, w poliestrowych —C—O—, w chlorokauczukowych C—Cl itd.

Kleje i kity dzieli się według różnych kryteriów; istotne znaczenie z przetwórczego punktu widzenia ma podział ze względu na:

a) *istotę przechodzenia ze stanu ciekłego lub plastycznego w stan stały*; według tego kryterium kleje i kity dzieli się na utwardzalne i termoplastyczne, a te ostatnie — na zestalające się poprzez ochładzanie i zestalające się na skutek odparowania oraz niekiedy absorpcji rozpuszczalnika;

b) *temperaturę utwardzania lub zestalania*; według tego kryterium kleje i kity dzieli się na przechodzące w stan stały w temperaturze normalnej lub w temperaturze podwyższonej (na ogół do 250°C);

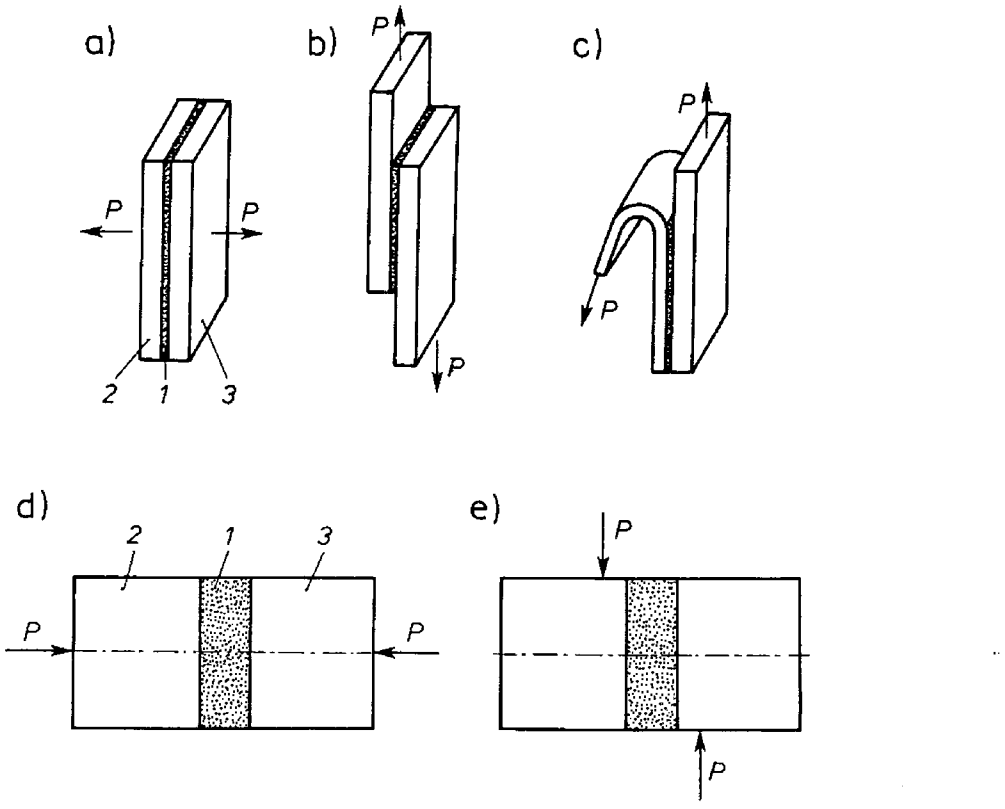


Rys. 4.28. Zależność wytrzymałości R złącza klejowego od zawartości c grup hydroksylowych OH w utwardzonym kleju epoksydowym [4.19]

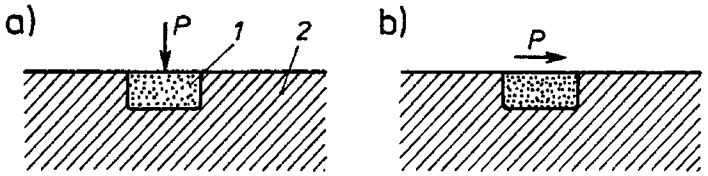
c) *stan skupienia przed powleczeniem powierzchni materiału;* zgodnie z tym kryterium kleje i kity dzieli się na ciekłe, plastyczne i stałe (proszek, granulat, pałeczki, folie–błony).

Podstawowe rodzaje obciążenia połączeń klejowych pokazano na rys. 4.29, a złącz kitowych na rys. 4.30.

Na ogół połączenia klejowe wykazują największą wytrzymałość na ścinanie i odrywanie. Obciążenia oddzierające oraz zginające w przypadku połączeń doczołowych znacznie zmniejszają wytrzymałość połączeń. W związku z tym połączenia

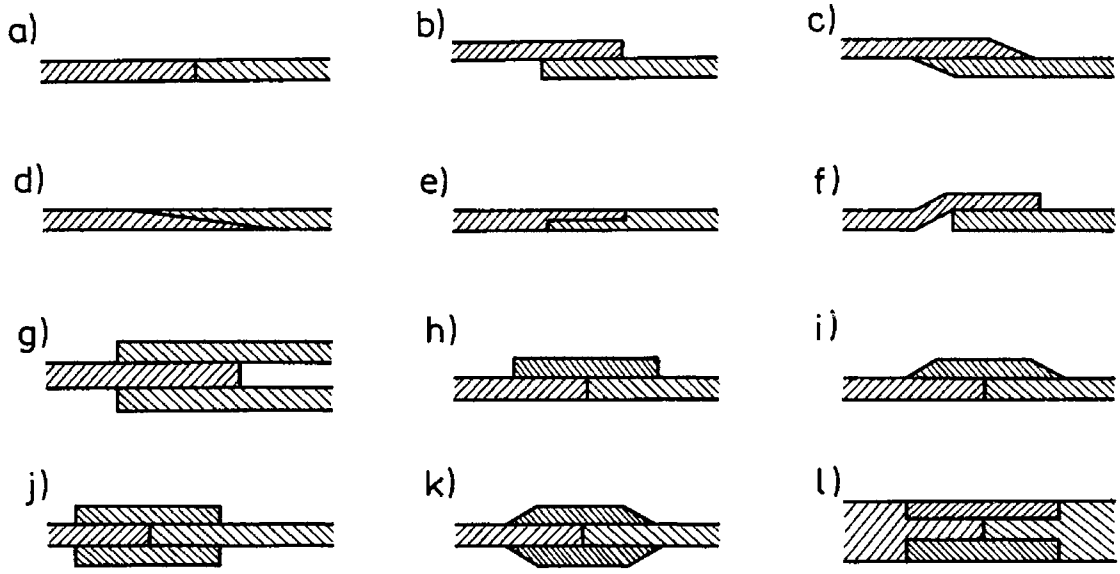


Rys. 4.29. Podstawowe rodzaje obciążenia połączeń klejowych: a) na odrywanie, b) na ścinanie, c) na oddzieranie, d) na ściskanie, e) na ścinanie ze zginaniem; a), b), c) skleina o grubości normalnej, czyli < 0,25 mm, d), e) skleina o grubości dużej (> 0,25 mm); *1* — skleina, *2* i *3* — materiały klejone



Rys. 4.30. Podstawowe rodzaje obciążenia złącz kitowych: a) na ściskanie, b) na tarcie; *1* — utwardzony lub zestalony kit, *2* — materiał kitowany

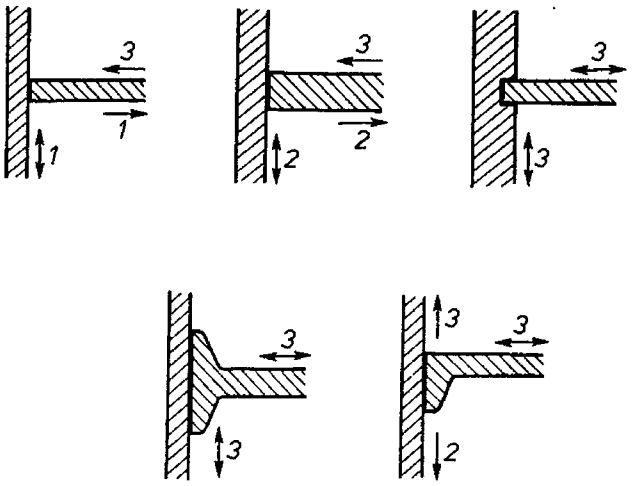
klejowe konstruuje się tak, aby przenosiły w największym stopniu obciążenia ścinające i odrywające, w najmniejszym zaś — oddzierające i zginające. Dąży się również do tego, aby naprężenie w skleinie było możliwie najmniejsze, co osiąga się w pewnych granicach, przy określonym stanie obciążeń połączenia, poprzez powiększenie pola powierzchni klejonych. Na rysunkach 4.31, 4.32 i 4.33 przedstawiono ważniejsze rodzaje połączeń klejowych.



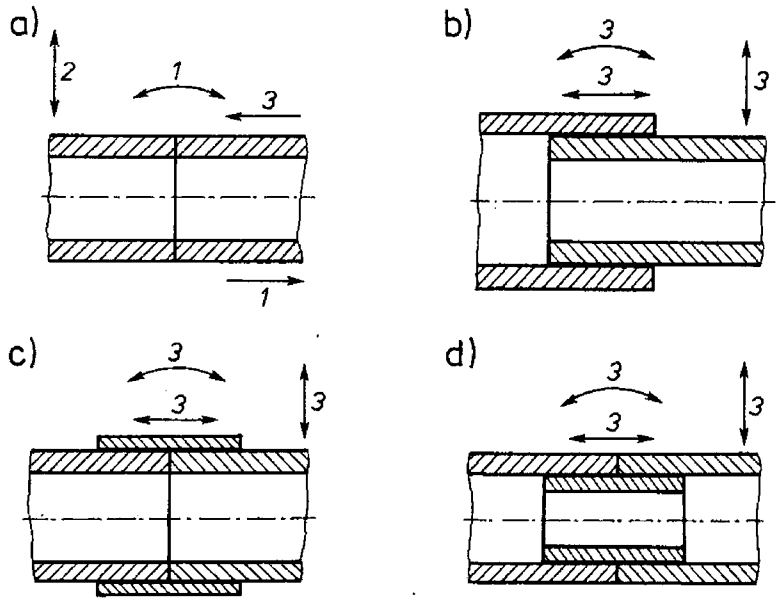
Rys. 4.31. Połączenia klejowe blach: a) doczołowe, b) zakładkowe proste o elementach ściętych prosto, c) jak w (b), lecz o elementach ściętych ukośnie, d) zakładkowe skośne, e) zakładkowe proste ścienione, f) zakładkowe odsadzane, g) przekładkowe, h) nakładkowe jednostronne o nakładce ściętej prosto, i) jak w (h), lecz o nakładce ściętej ukośnie, j) nakładkowe dwustronne o nakładkach ściętych prosto, k) jak w (j), lecz o nakładkach ściętych ukośnie, l) nakładkowe ścienione

Właściwości połączeń klejowych zależą od bardzo wielu czynników, z których ważniejsze to [4.15, 4.41, 4.47, 4.114, 4.115]: rodzaj kleju, przygotowanie warstwy wierzchniej do łączenia, warunki utwardzania lub zestalania kleju, rozwiązanie konstrukcyjne połączenia, wartość, sposób i czas działania obciążenia (rys. 4.34). Pod pojęciem rodzaj kleju rozumie się również rodzaj i zawartość napełniacza proszkowego (tabl. 4.4).

Szczególnie duże znaczenie ma połączenie zakładkowe proste o elementach ściętych prosto (rys. 4.31b). Było ono od dawna analizowane przez wielu badaczy, jak O. Volkersen, M. Goland, E. Reissner, F.J. Plantema, a w Polsce M. Misztal, R. Cichowicz, J. Godzimirski. Współczesne ujęcia oraz pewne rozwinięcia tych analiz



Rys. 4.32. Połączenia klejowe teowe i kierunki ich obciążeń: *1* — niedopuszczalny, *2* — dopuszczalny, *3* — najwłaściwszy



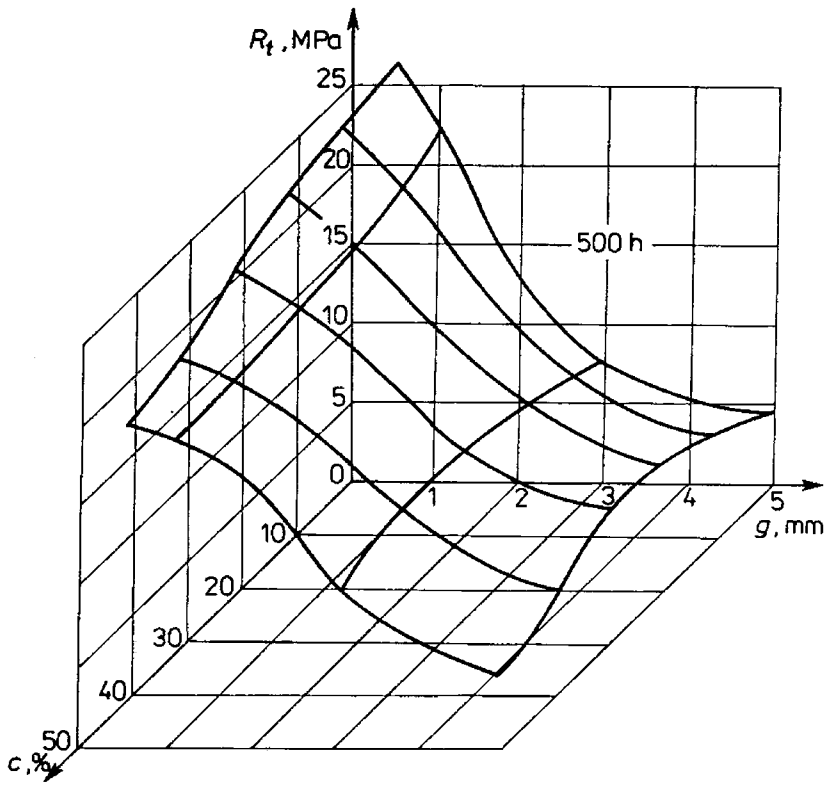
Rys. 4.33. Połączenia klejowe rur i kierunki ich obciążeń: a) doczołowe, b) zakładkowe walcowe, c) nakładkowe zewnętrzne, d) nakładkowe wewnętrzne; *1* — niedopuszczalny, *2* — dopuszczalny, *3* — najwłaściwszy

są zawarte w literaturze [4.17, 4.49, 4.99], dlatego dalej problematyka ta zostanie tylko zasygnalizowana.

W obliczeniach tych połączeń przyjmuje się założenie, że elementy łączone są rozciągane, a naprężenie styczne powstaje tylko w skleinie, i korzysta z następującej zależności:

$$\tau = \frac{P}{A\,\beta} \leqslant k_t = \frac{R_t}{X_R} \tag{4.20}$$

w której P oznacza siłę obciążającą połączenie, A — pole powierzchni klejonych, β — współczynnik spiętrzenia naprężenia stycznego τ (rys. 4.35), k_t — dopuszczalne naprężenie styczne, R_t — wytrzymałość połączenia na ścinanie, X_R — współczynnik bezpieczeństwa wynoszący na ogół $2 \div 4$. Pomijając naprężenie gnące wynikające z mimośrodowości obciążenia, wywołane momentem zginającym



Rys. 4.34. Zależność długotrwałej wytrzymałości na ścinanie R_t połączenia klejowego od grubości g skleiny i zawartości c napełniacza proszkowego w kleju: stosowano żywicę epoksydową Epidian 5, utwardzacz trietylenotetraaminę, połączenia jak na rys. 4.29e o wymiarach przekroju poprzecznego 15 × 20 mm, proszek płatkowy Al [4.90]

Tablica 4.4

Niektóre właściwości połączenia klejowego uzyskanego klejem epoksydowym [4.9]

Rodzaj napełniacza	Zawartość napełniacza %	Współczynnik rozszerzalności 10^{-6}, °C	Wytrzymałość na ścinanie MPa	
			20°C	60°C
Bez napełniacza	—	65	7,2	8,5
Proszek Al	40	61,1	18,0	20,0
Krzemionka	90	43,9	10,2	8,6
Talk	60	45,4	18,5	18,5
Mika	14	49,7	16,5	19,7

$$M = P\left[s + \frac{(g_1 + g_2)}{2}\right] \tag{4.21}$$

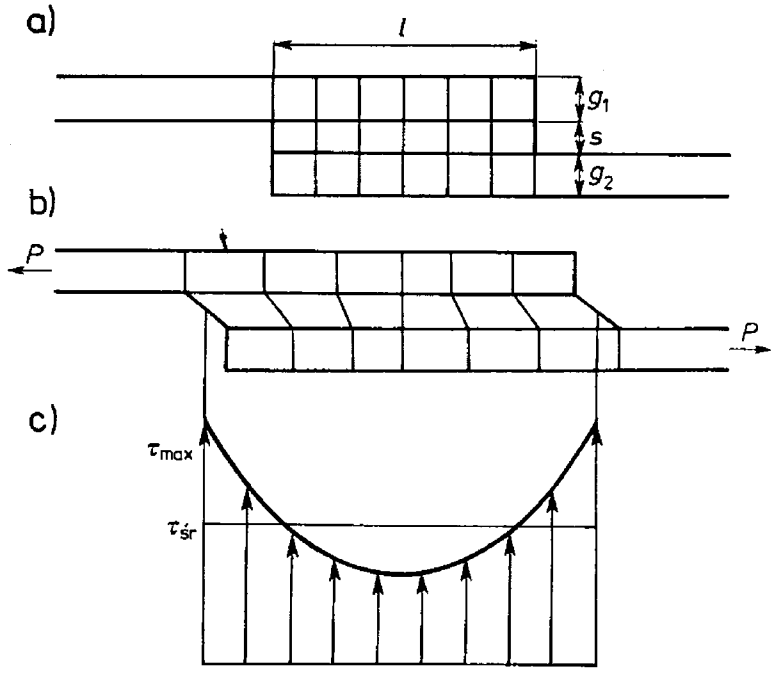
współczynnik spiętrzenia naprężenia można określić zależnością

$$\beta = \frac{\tau_{max}}{\tau_{śr}} = \sqrt{\frac{A}{B}}\ \frac{B - 1 + \cosh\sqrt{AB}}{\sinh\sqrt{AB}} \tag{4.22}$$

Współczynnik A długości połączenia ma postać

$$A = \frac{G l^2}{E_2\, g_2\, s} \tag{4.23}$$

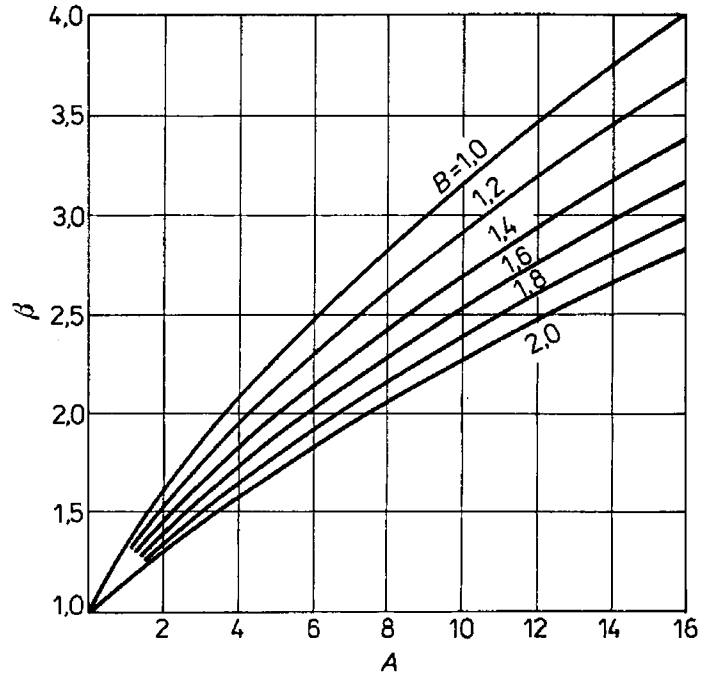
natomiast współczynnik B grubości elementów łączonych



Rys. 4.35. Połączenie klejowe zakładkowe o elementach ściętych prosto: a) przed obciążeniem, b) po obciążeniu, c) rozkład naprężenia stycznego w skleinie: l — długość połączenia nie obciążonego, g_1 i g_2 — grubości elementów łączonych, s — grubość skleiny nie obciążonej

$$B = 1 + \frac{E_2 g_2}{E_1 g_1} \tag{4.24}$$

gdzie l, s, g_1 oraz g_2 oznaczają wymiary połączenia według rys. 4.35, E_1 i E_2 — współczynniki sprężystości wzdłużnej łączonych elementów, G — współczynnik sprężystości postaciowej (poprzecznej) skleiny. Zależność $\beta = \mathrm{f}(A, B)$ przedstawiono na rys. 4.36. Jeżeli $E_1 g_1 = E_2 g_2$, to $B = 2$ i wzór (4.22) przybiera postać



Rys. 4.36. Zależność współczynnika β spiętrzenia naprężenia stycznego od współczynnika A długości połączenia oraz współczynnika B grubości elementów łączonych

$$\beta = \sqrt{\frac{A}{2}} \operatorname{ctgh} \sqrt{\frac{A}{2}} \tag{4.25}$$

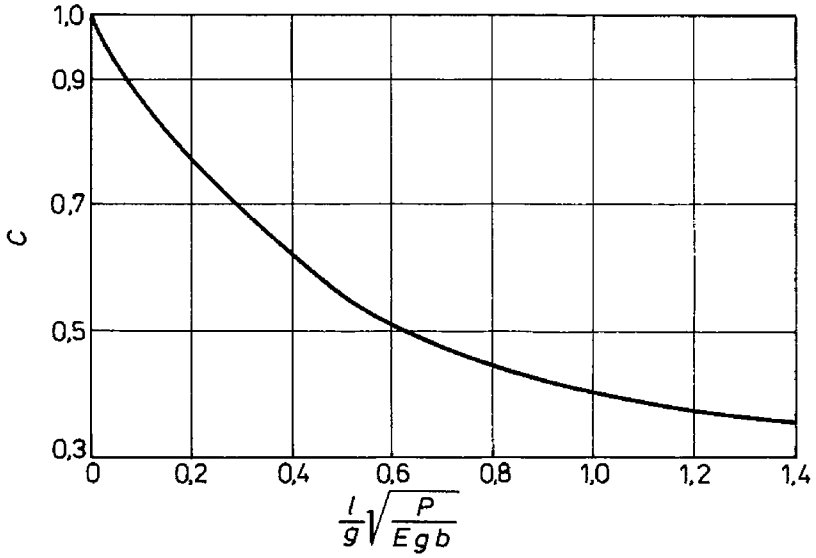
Przy uwzględnieniu naprężenia gnącego, wzór na współczynnik β przybiera postać

$$\beta = \frac{1+3C}{4} \sqrt{2A} \operatorname{ctgh} \sqrt{2A} + \frac{3}{4}(1-C) \tag{4.26}$$

gdzie C oznacza współczynnik zginania połączenia, który przy założeniu, że $g_1 = g_2 = g$ oraz $E_1 = E_2 = E$, czyli w przypadku połączeń symetrycznych, wyznacza się z zależności

$$\frac{1}{C} = 1 + 2\sqrt{2} \operatorname{tgh} \sqrt{\frac{3}{4}(1-\nu^2)} \frac{l}{2g} \sqrt{\frac{P}{Egb}} \tag{4.27}$$

gdzie ν oznacza współczynnik Poissona skleiny, b — szerokość połączenia. Na rysunku 4.37 jest pokazana zależność $C = \mathrm{f}\left(\frac{l}{g}\sqrt{\frac{P}{Egb}}\right)$.



Rys. 4.37. Zależność współczynika C zginania połączenia od wyrażenia $\frac{l}{g}\sqrt{\frac{P}{Egb}}$

W celu porównania wytrzymałości połączeń symetrycznych używa się współczynnika de Bruyna w postaci

$$I = \frac{\sqrt{g}}{l} \tag{4.28}$$

Połączenia o takim samym współczynniku połączenia mają jednakową wytrzymałość. Średnie naprężenie niszczące można więc, wprowadzając stałą K, określić następująco:

$$\tau_m = \frac{P}{l\,b} = K\frac{\sqrt{g}}{l} \tag{4.29}$$

Jak uzasadnił to J. Kuczmaszewski [4.48], stosowanie wzorów (4.28) i (4.29) bez analizy sztywności zginania łączonych elementów i właściwości sprężystych skleiny może prowadzić do błędnych wniosków.

W omawianych połączeniach istnieje graniczna długość zakładki, której przekroczenie nie zwiększa wytrzymałości połączenia. W połączeniu symetrycznym można ją obliczyć z zależności

$$l_{gr} = 5\sqrt{\frac{Egs}{2G}} \tag{4.30}$$

Współczynnik bezpieczeństwa X_R [4.20] wyznacza się nie tylko arbitralnie, ale dysponując wynikami badań doświadczalnych można go określić metodą statystyczną. Na poziomie ufności 0,95 otrzymuje się zależność [4.48, 4.49]

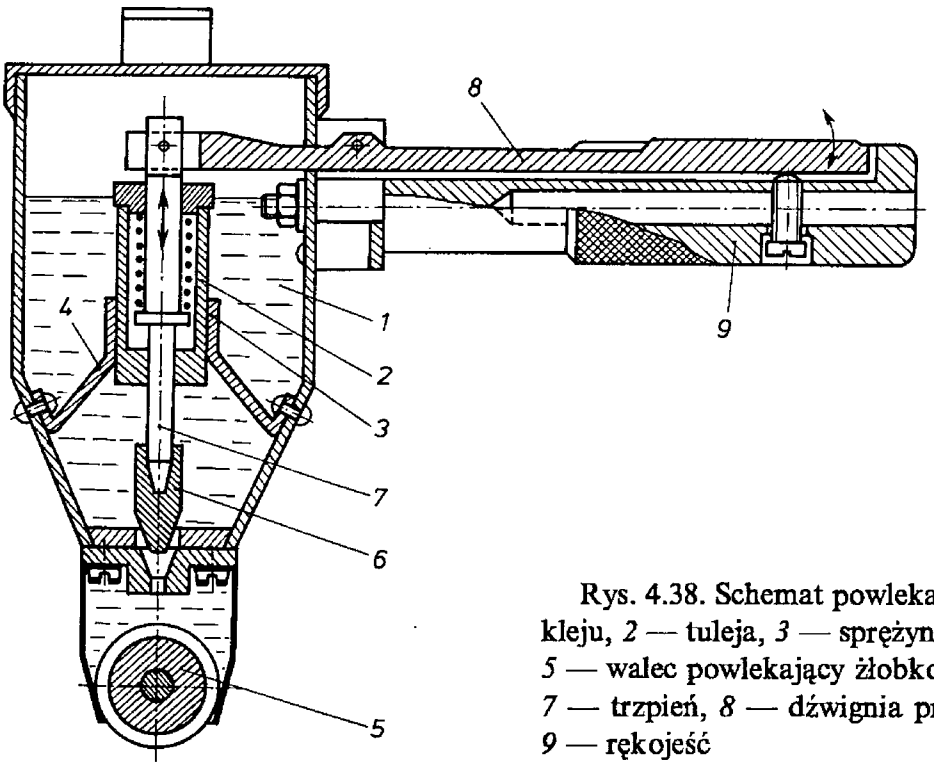
$$X_R = 1{,}64\,\frac{\sigma(P_n)}{P_0} + 1 \tag{4.31}$$

gdzie $\sigma(P_n)$ jest odchyleniem standardowym siły niszczącej, P_0 zaś — zakładaną wartością siły obciążającej połączenie.

4.3.2. Technologia klejenia i kitowania

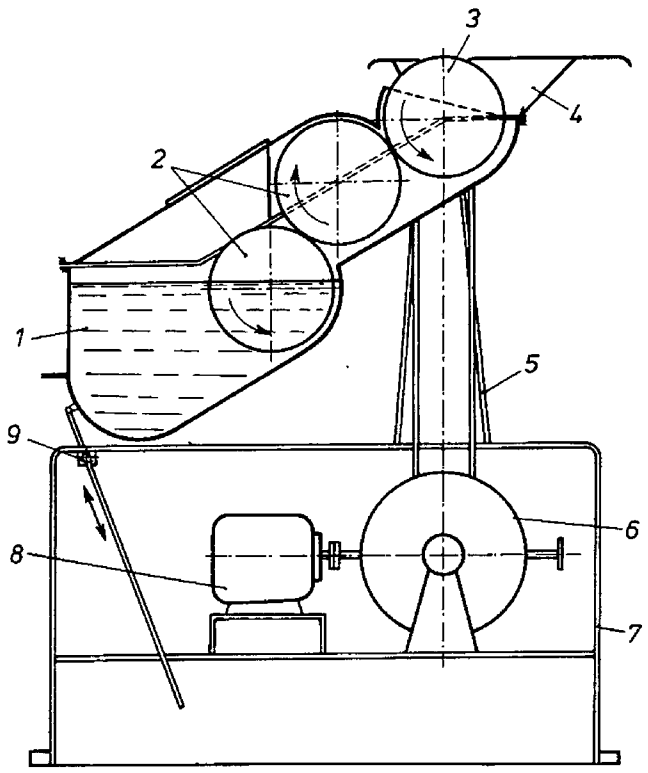
Na ogół klej przed użyciem należy odpowiednio sporządzić. Sporządzanie kleju utwardzalnego polega najczęściej na zmieszaniu składników kleju w potrzebnych proporcjach i w odpowiedniej kolejności; sporządzanie kleju w stanie stałym polega głównie na suszeniu, a gdy klej ma postać folii (błon) — na wycięciu wykrojów o wymiarach i kształcie odpowiadających połączeniu.

Powlekanie klejem powierzchni odpowiednio przygotowanej warstwy wierzchniej materiału odbywa się za pomocą ręcznych narzędzi pracy, takich jak pędzle, bagietki, łopatki, bądź za pomocą maszyn, zwanych *powlekarkami*. Powlekarki, w istocie działania podobne do nanoszarek walcowych, mogą być przenośne (rys. 4.38) lub



Rys. 4.38. Schemat powlekarki przenośnej: *1* — zbiornik kleju, *2* — tuleja, *3* — sprężyna dociskowa, *4* — wspornik, *5* — walec powlekający żłobkowany, *6* — grzybek zaworu, *7* — trzpień, *8* — dźwignia przyciskana ręką pracownika, *9* — rękojeść

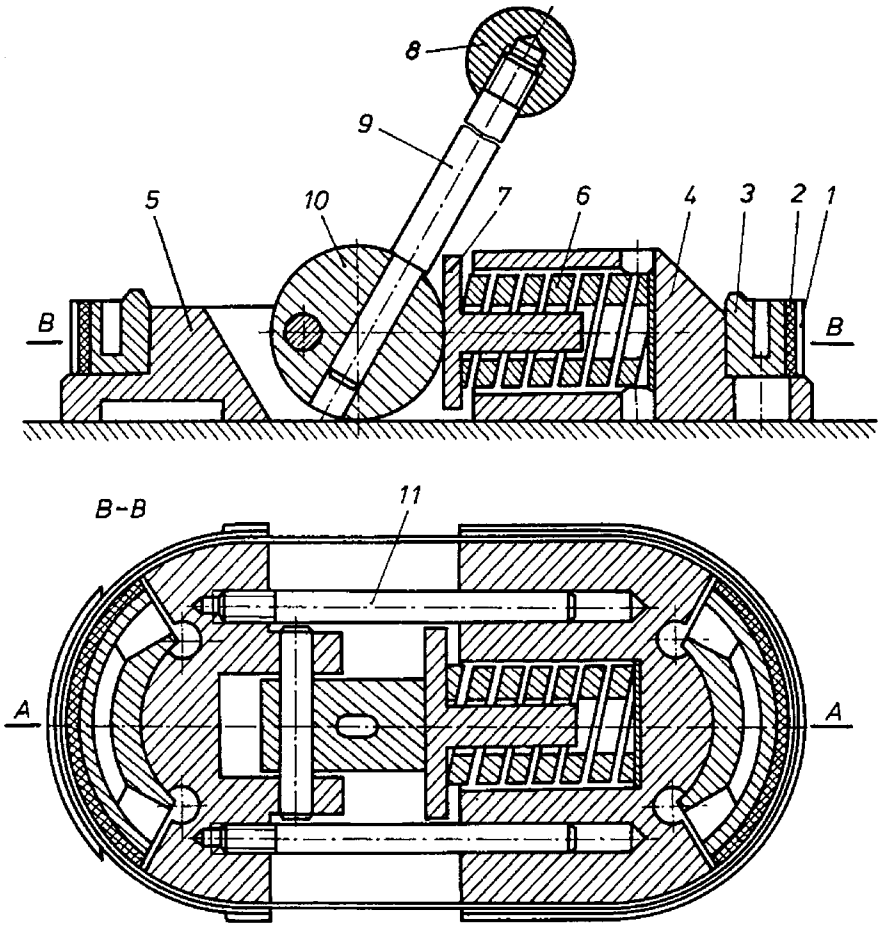
stacjonarne (rys. 4.39). W obu rozwiązaniach elementem, który przenosi klej, jest walec powlekający, stykający się z powierzchnią. Przedstawione przykładowo powlekarki służą do powlekania powierzchni płaskich lub kształtowych o dużym promieniu krzywizny. Podobnie w powlekarkach do powlekania powierzchni o małym promieniu krzywizny (powierzchni wewnętrznych) zasadniczym elementem jest walec powlekający [4.101]. Powlekanie można również prowadzić techniką natrysku pneumatycznego [4.112].



Rys. 4.39. Schemat powlekarki stacjonarnej: *1* — zbiornik kleju, *2* — walce podające, *3* — walec powlekający, *4* — stół, *5* — stojak, *6* — przekładnia do bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej walca powlekającego, *7* — korpus, *8* — silnik elektryczny, *9* — element do regulacji położenia zbiornika kleju w zależności od ilości kleju

Przebieg procesu klejenia jest determinowany głównie przez: temperaturę, czas i nacisk. Temperatura klejenia zależy przede wszystkim od temperatury polimeryzacji lub topnienia użytego kleju, temperatury topnienia albo mięknienia materiałów łączonych oraz od żądanych właściwości połączenia, natomiast czas klejenia określonym klejem zależy od temperatury klejenia. Nacisk wywierany podczas klejenia powinien zapewniać właściwy przebieg procesu polimeryzacji, dokładne przyleganie do siebie części łączonych oraz optymalną grubość skleiny, która na ogół zawiera się w granicach $20 \div 200$ μm. Wartość nacisku zależy od tego, czy klej przechodzi w stan stały w wyniku polimeryzacji kondensacyjnej (nacisk duży rzędu 1 MPa i większy), czy w inny sposób (nacisk mały rzędu 0,05 MPa).

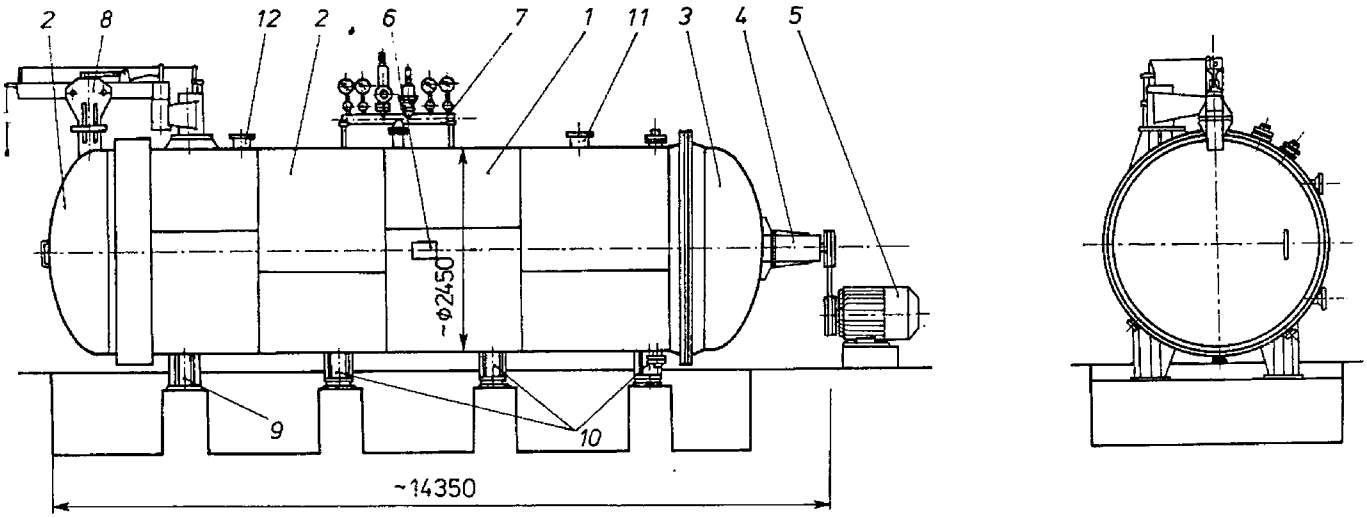
Aby utrzymać w procesie klejenia potrzebne wartości wymienionych parametrów, przeprowadza się go w specjalnych przyrządach klejarskich oraz za pomocą odpowiednich urządzeń. Przyrządy klejarskie spełniają funkcję ustalającą wzajemne położenie elementów klejonych, jak również funkcję dociskającą — zapewniającą docisk



Rys. 4.40. Przyrząd do klejenia okładzin ciernych sprzęgła odśrodkowego: *1* — taśma stalowa, *2* — okładzina cierna, *3* — szczęka sprzęgła, *4* i *5* — uchwyty, *6* — sprężyna, *7* — popychacz, *8* — gałka ręczna, *9* — dźwignia, *10* — krzywka, *11* — prowadnice uchwytów

elementów [4.87]. Na rysunku 4.40 przedstawiono przykładowo przyrząd klejarski do okładzin ciernych sprzęgła odśrodkowego. Podobne jego rozwiązania można znaleźć w literaturze [4.30, 4.52]. Zazwyczaj przyrządy klejarskie, po ustaleniu i dociśnięciu elementów klejonych, umieszcza się razem z nimi w komorach lub tunelach grzejnych z regulowaną temperaturą w celu utwardzenia bądź zestalenia kleju.

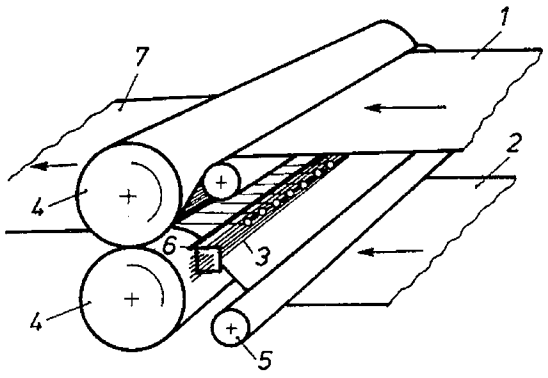
Specyficznym zagadnieniem jest *klejenie konstrukcji lotniczych*, konstrukcje te odznaczają się bowiem dużymi wymiarami, złożonymi kształtami, są stosunkowo delikatne i stawia się im specjalne wymagania jakościowe [4.5, 4.17]. Charakterystycznymi urządzeniami stosowanymi w klejeniu konstrukcji lotniczych są autoklawy, np. takie jak pokazany na rys. 4.41. Przyrządy klejarskie z ustalonymi wzajemnie elementami klejonymi pokrywa się przeponą — workiem elastomerowym, często z gumy odpornej na podwyższoną temperaturę, worek uszczelnia się i całość umieszcza na wózkach poruszanych po torach jezdnych usytuowanych w autoklawie i przed nim. Łączna masa wsadu może dochodzić do 8000 kg. Następnie odsysa się powietrze z worka, uzyskując ciśnienie 0,015÷0,02 MPa. Wózki wprowadza się do autoklawu, autoklaw zamyka i za pomocą gazu obojętnego wytwarza ciśnienie do 1,6 MPa oraz podnosi się temperaturę wnętrza autoklawu do 200°C. Po zakończonym procesie klejenia włącza się układ chłodzenia wodnego, prowadząc ochładzanie wsadu



Rys. 4.41. Autoklaw (bez instalacji oraz układu sterowania i regulacji): *1* — walczak, *2* — dennica otwierana, *3* — chłodnica, *4* — łożyskowanie wentylatora, *5* — silnik napędu wentylatora, *6* — sygnalizacja „człowiek w autoklawie", *7* — zestaw wskaźników przyrządów pomiarowych, *8* — zespół otwierania i zamykania dennicy, *9* — podpora stała, *10* — podpory ruchome, *11* — wlot gazu obojętnego, *12* — wylot powietrza (WSK „PZL" Świdnik)

z szybkością $1 \div 2$K/min do temperatury $40 \div 50$°C, ciśnienie w autoklawie i w worku doprowadza się do ciśnienia atmosferycznego, po czym autoklaw otwiera się i wyprowadza wózki.

Do specyficznych zagadnień należy również *klejenie opakowań*. Na przykład na rys. 4.42 przedstawiono schematycznie klejenie tektury falistej (*1*) z kartonem (*2*) za pośrednictwem nici polimerowych, głównie poliamidowych (*3*) powleczonych uprzednio klejem termoplastycznym. Wymienione elementy są łączone w sposób ciągły za pomocą walców ogrzewanych (*4*), powodujących stopienie kleju i docisk wzajemny kartonu, tektury i nici, tworzących materiał opakowaniowy na pudła.



Rys. 4.42. Schemat klejenia materiału opakowaniowanego (tektura – karton – nici polimerowe): *1* — tektura falista, *2* — karton, *3* — nici polimerowe, *4* — walce ogrzewane, *5* — wałki prowadzące, *6* — wodzik nici, *7* — materiał opakowaniowy [4.27]

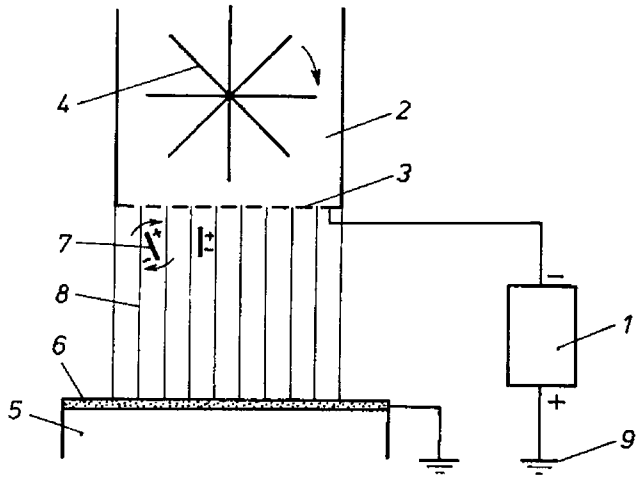
Klejenie i kitowanie konstrukcyjne stosuje się efektywnie również w procesach naprawy maszyn. Bliższe dane na ten temat znajdują się w literaturze [4.88, 4.89].

4.4. Zamszowanie

Pod nazwą zamszowanie rozumie się nanoszenie cząstek, najczęściej w kształcie włókienek z tego samego materiału lub z kilku materiałów, o jednakowych lub różnych rozmiarach, na powierzchnię przedmiotu z tworzywa litego lub porowatego, uprzednio powleczoną klejem. Po zestaleniu lub utwardzeniu kleju i dalszych zabiegach otrzymuje się wytwór pokryty zamszem. Nanoszenie włokienek może odbywać się mechanicznie, przez zastosowanie drgań lub strumienia powietrza, bądź elektrostatycznie w polu elektrycznym wysokiego napięcia i wreszcie przy zastosowaniu kombinacji tych trzech możliwości. Największe znaczenie ma *zamszowanie elektrostatyczne* [4.54, 4.98, 4.103] i jemu poświęci się więcej uwagi.

Kleje do zamszowania elektrostatycznego to głównie kleje zawiesinowe, naczęściej akrylowe, kleje rozpuszczalnikowe, przede wszystkim uretanowe, oraz wreszcie pasty PVC lub kopolimerów PVC. Siły adhezji kleju do włókienek muszą być większe od sił pola elektrycznego wyciągających rozładowane włókienka z kleju, a czas trwania kleju powinien być wystarczający do utworzenia runa. Rezystywność powierzchniowa kleju nie powinna być większa niż $10^6\ \Omega$.

Włókienka odznaczają się rezystywnością powierzchniową $10^6 \div 10^9\ \Omega$, którą konstytuuje się poprzez stosowanie odpowiednich preparacji, np. soli z grupy amoniaku. Stosuje się włókienka wiskozowe, poliamidowe, bawełniane i inne, o długości $0{,}3 \div 10$ mm.

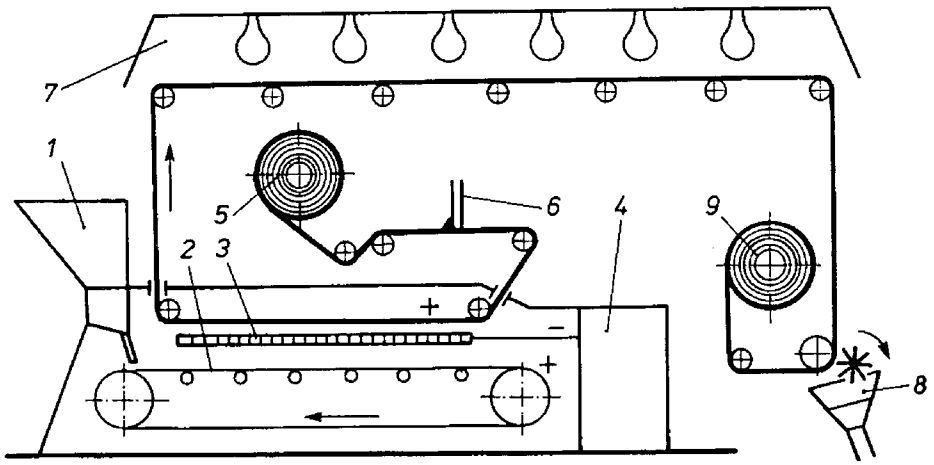


Rys. 4.43. Zasada działania urządzenia do zamszowania: *1* — źródło wysokiego napięcia, *2* — układ dozujący włókienka, *3* — elektroda, *4* — element obrotowy, *5* — przedmiot zamszowany, *6* — warstwa kleju, *7* — włókienka, *8* — linie sił pola elektrycznego, *9* — uziemienie

Urządzenie do zamszowania elektrostatycznego (rys. 4.43) składa się ze źródła wysokiego napięcia (*1*), układu dozującego włókienka (*2*) z elektrodą (*3*) i elementu obrotowego (*4*), wymuszającego wydostawanie się włókienek z układu dozującego. Źródło wysokiego napięcia wytwarza potencjał elektryczny, np. ujemny, w układzie dozującym, z którego wydostające się naładowane włókienka orientują się w kierunku linii pola elektrycznego i przemieszczają do powierzchni przedmiotu, wbijając się w warstwę kleju. W warstwie tej tracą ujemny ładunek elektryczny i są poddawane siłom wyciągającym je z warstwy kleju oraz ustawiają się równolegle do linii sił pola,czyli

prostopadle do powierzchni przedmiotu. Włókienka, które nie mogły wbić się w warstwę kleju, oddają swoje ładunki do ziemi za pośrednictwem włókienek już zakotwiczonych w kleju i wracają z powrotem do elektrody pozostającej pod wysokim napięciem (30÷50 kV). Klej poddaje się zestaleniu lub utwardzeniu, a nadmiar włókienek usuwa się przez szczotkowanie połączone z drganiami.

W urządzeniach do zamszowania stosuje się często układ elektroda–przedmiot rozwiązany inaczej, niż to pokazano na rysunku 4.42. Elektroda ujemna może się mianowicie znajdować między włokienkami przeznaczonymi do nanoszenia a przedmiotem, co przykładowo w odniesieniu do zamszowania wstęg tworzywa przedstawiono na rys. 4.44.



Rys. 4.44. Schemat urządzenia do ciągłego zamszowania wstęg (np. folii): *1* — zasobnik włókienek, *2* — uziemiony przenośnik taśmowy, *3* — elektroda wysokiego napięcia sitowa, *4* — źródło wysokiego napięcia, *5* — zwój wstęgi tworzywa uziemionego, *6* — powlekanie taśmy klejem, *7* — nagrzewanie promiennikowe do zestalania lub utwardzania kleju, *8* — szczotkowanie i odsysanie nadmiaru włókienek, *9* — zwój wstęgi zamszowanej

4.5. Drukowanie

Nanoszenie farby graficznej, według świadomie ustalonych znaków i obrazów, na przedmioty z różnych materiałów, w tym z tworzyw wielkocząsteczkowych, za pomocą narzędzia — *formy drukowej* zamocowanej w *maszynie drukarskiej* (drukarce) — nosi nazwę drukowania. Drukowanie przeprowadza się na przedmiotach wykonanych innymi metodami przetwórstwa, zarówno z tworzyw termoplastycznych, jak i utwardzalnych.

4.5.1. Podstawy procesu drukowania

Farby graficzne są na ogół płynami nieniutonowskimi reostabilnymi lub reologicznie niestabilnymi, wykazującymi granicę płynięcia. W ujęciu klasycznym, matematycznym modelem reologicznym tych płynów jest model Binghama, który przy powszechne stosowanych oznaczeniach ma postać

$$\tau = \tau_y + \eta_p \dot{\gamma} \tag{4.32}$$

ale mogą być też stosowane inne modele, np. uogólniony model Cassona

$$\tau^{1/n} = \tau_y^{1/n} + (\eta_p \dot{\gamma})^{1/n} \tag{4.33}$$

lub model Cassona [4.40]

$$\tau^{0,5} = \tau_y^{0,5} + (\eta_p \dot{\gamma})^{0,5} \tag{4.34}$$

Farby graficzne są charakteryzowane pod względem reologicznym i drukowym głównie następującymi wielkościami:

— *lepkością plastyczną* η_p,
— *granicą płynięcia* τ_y,
— *krótkością* K farby definiowaną według Zettlemoyera

$$K = \frac{\tau_y}{\eta_p} \tag{4.35}$$

— *kleistością*.

Krótkość K farby waha się najczęściej od kilku do kilkunastu s^{-1} — im K jest większe, tym farba jest krótsza. Stwierdzono, że do drukowania półtonowego należy stosować farby krótkie, ponieważ nie zniekształcają one kresek i punktów przez ich pogrubienie lub pomniejszenie, i odwrotnie — do drukowania tonów pełnych (płaszczyzn — apli) nadają się farby o małej wartości K ze względu na uzyskiwanie równomiernego rozłożenia farby na podłożu — tworzywie.

Kleistość definiuje się jako siłę niezbędną do pokonania oporu warstwy farby podczas jej rozrywania w ustalonych warunkach, zwłaszcza temperatury i prędkości. Rozrywanie farby jest nieodłączną cechą drukowania i występuje w całym zespole farbowym drukarki w momencie przechodzenia farby z kałamarza przez układ walców na formę drukową, a z formy na tworzywo.

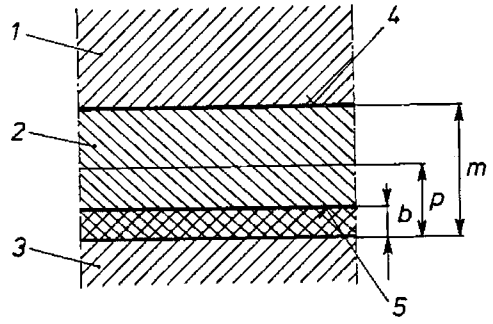
Wymienione wielkości powinny być dobrane w zależności od odmiany i warunków drukowania, głównie prędkości drukowania i nacisku formy drukowej, od rozwiązania konstrukcyjnego i materiałowego formy, a także od właściwości tworzyw, np. wytrzymałości mechanicznej, struktury geometrycznej powierzchni i charakterystyki energetycznej warstwy wierzchniej i wreszcie od wymagań jakościowych stawianych przedmiotom drukowanym [4.31]. W tablicy 4.5 zestawiono dla przykładu wartości podstawowych wielkości charakteryzujących farby graficzne.

Tablica 4.5

Skład i właściwości farby graficznej (przykład) [4.9]

Nazwa	Jednostka	Umowny symbol farby	
		A	B
Błękit pigmentowy B Ftalak L-66 Olej lniany Suszka 1610	% mas.	20,07 53,18 24,75 2,00	18,00 50,00 30,00 2,00
Lepkość w temperaturze 25°C (oznaczanie według BN-78/7469-09.04)	Pa·s	37,0	21,6
Granica płynięcia w temperaturze 25°C (oznaczanie według BN-78/7469-09.04)	Pa	700	400
Krótkość	s^{-1}	18,9	18,5
Kleistość w temperaturze 32,2°C (oznaczanie według BN-80/7469-23)	TA	16,6	11,8

Drukowalność farb graficznych, rozumianą zgodnie z ogólnym pojęciem przetwarzalności, określa się głównie za pomocą takich wskaźników drukowalności, jak przenoszenie farby z formy na tworzywo, równomierne przenoszenie farby w przypadku drukowania płaszczyzn (apli) oraz ostrość kreski i punktu na odbitkach. Szczególną rolę przypisuje się przenoszeniu farby, którego model pokazano na rys. 4.45. W modelu tym m oznacza jednostkową ilość farby przywartej do formy przed drukowaniem, na ogół wyrażaną w g/m^2, p — ilość farby przeniesionej na jednostkę pola powierzchni, b — jednostkową ilość farby unieruchomionej przez tworzywo.



Rys. 4.45. Model przenoszenia farby graficznej: *1* — forma drukowa, *2* — farba graficzna, *3* — tworzywo drukowane, *4* — powierzchnia formy, *5* — powierzchnia tworzywa

Wymienione wielkości są związane równaniem Walkera–Fetsko [4.2, 4.116]

$$p = b + \xi(m-b) \tag{4.36}$$

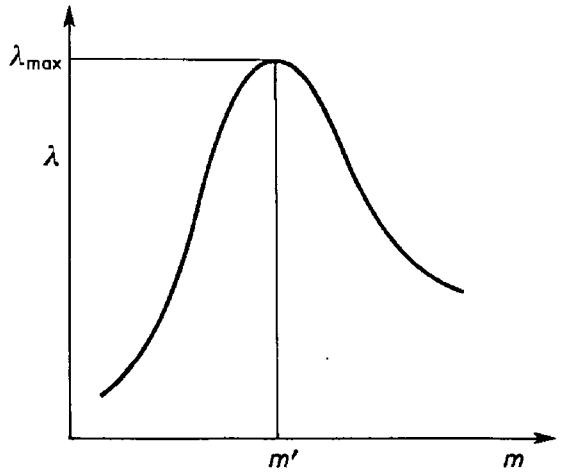
lub

$$p = \xi m + b(1 - \xi) \tag{4.37}$$

gdzie ξ oznacza współczynnik podziału wolnej farby, zwykle $\xi \leqslant 0{,}5$. Przenoszenie farby można również charakteryzować wskaźnikiem rozdziału farby definiowanym następująco:

$$\lambda = \frac{p}{m - p} \tag{4.38}$$

Na rysunku 4.46 przedstawiono zależność $\lambda = f(m)$, zwaną *krzywą rozdziału farby*. Punkt λ_{max} na krzywej odpowiada jednostkowej ilości farby m', przy której nastąpiło jej największe przeniesienie.



Rys. 4.46. Krzywa rozdziału farby graficznej [4.116]

Typowe farby graficzne wykazują zadowalającą adhezję tylko do tworzyw ulegających zwilżaniu [4.117] i częściowemu rozpuszczeniu pod wpływem działania

zastosowanych farb. Tych cech nie wykazują polimery niepolarne i nierozpuszczalne, jak np. PE, PP i PTFE. Polepszenie adhezji uzyskuje się w tych przypadkach poprzez odpowiednie przygotowanie warstwy wierzchniej przedmiotów, których powierzchnie zamierza się drukować. Stosuje się głównie aktywowanie warstwy wierzchniej (rozdz. 2, p. 2.5.2), a więc działanie na nią wyładowaniami elektrycznymi niezupełnymi (koronowymi), płomieniem (opłomienianie), wyładowaniami jarzeniowymi, promieniami nadfioletowymi, laserem, a także stosuje się obróbkę chemiczną, np. utlenianie i trawienie kwasami.

Forma drukowa jest charakteryzowana pojęciem *zdolności do drukowania* lub krótko *drukownością*, podobnie jak przydatność narzędzi przetwórczych do drukowania, przede wszystkim z możliwie dużą wydajnością, z zachowaniem wymaganych cech jakościowych znaku lub obrazu, przy najmniejszym zużyciu formy oraz najmniejszych kosztach jednostkowych. *Przetwórczość* form drukowych zależy przede wszystkim od cech konstrukcyjnych formy, związanych z odmianą drukowania, od właściwości i struktury materiałów użytych do jej wytwarzania, zwłaszcza do wytworzenia elementów stykających się z farbą i przedmiotem drukowanym, oraz wreszcie od warunków eksploatacji formy. Formy drukowe wykonuje się głównie z metali, elastomerów i tworzyw specjalnych — fotopolimerów.

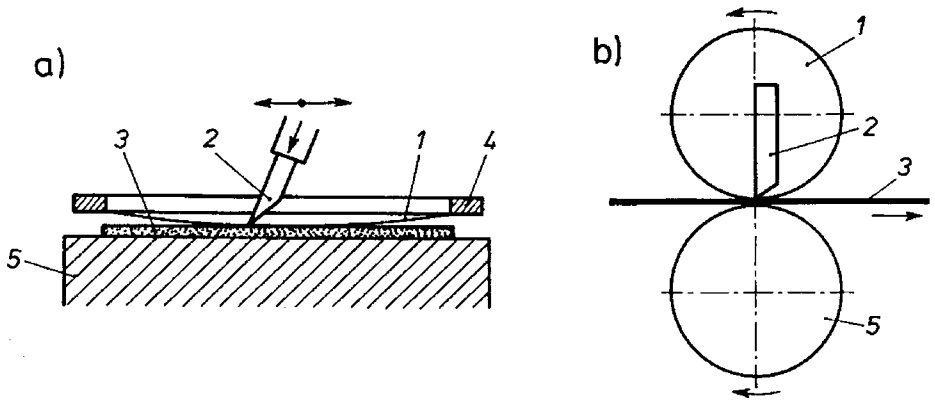
4.5.2. Technologia drukowania

Istnieje kilka odmian drukowania przedmiotów z tworzyw. Duże znaczenia ma drukowanie wzornikowe, wklęsłe, wypukłe, płaskie i kombinowane. Cztery pierwsze odmiany zalicza się do drukowania klasycznego.

Drukowanie wzornikowe

Drukowanie to polega na przeniesieniu farby graficznej przez formę drukową, którą stanowi wzornik umieszczony bezpośrednio na powierzchni przedmiotu lub przywierający do powierzchni na określonym polu, na tę powierzchnię. Wzornikiem może być arkusz tektury, płyta z tworzywa lub blacha metalowa z wycięciami odpowiadającymi drukowanemu obrazowi bądź znakowi. Wzornik bardziej złożony otrzymuje się z gazy młyńskiej lub drobnej siatki metalowej bądź polimerowej napiętej na ramie; tego rodzaju wzornik nazywa się *wzornikiem sitowym*, a drukowanie przy jego użyciu — *drukowaniem sitowym (sitodrukiem)*. W celu utworzenia żądanych znaków lub obrazów na wzorniku sitowym, gazę lub siatkę pokrywa się światłoczułą emulsją żelatyny. Po wysuszeniu żelatyny światłem dziennym następuje przekształcenie jej w materiał nierozpuszczalny w wodzie, natomiast fragmenty zakryte rysunkiem ulegają rozpuszczeniu w wodzie. W ten sposób uzyskuje się na gazie lub siatce miejsca przepuszczalne dla farby.

Podczas drukowania wzornik napełnia się farbą, którą przenosi się ręcznie lub mechanicznie na powierzchnię przedmiotu, za pomocą listwy zgarniającej zwanej *raklem*, pędzla lub wałka gumowego. Stosuje się również pistolety natryskowe. Drukowanie sitowe może być realizowane w dwóch zasadniczych przypadkach (rys. 4.47), jako drukowanie płaskie, w którym ruch roboczy postępowo-zwrotny wykonuje tylko rakiel, albo jako drukowanie obrotowe, w którym ruch obrotowy wykonuje

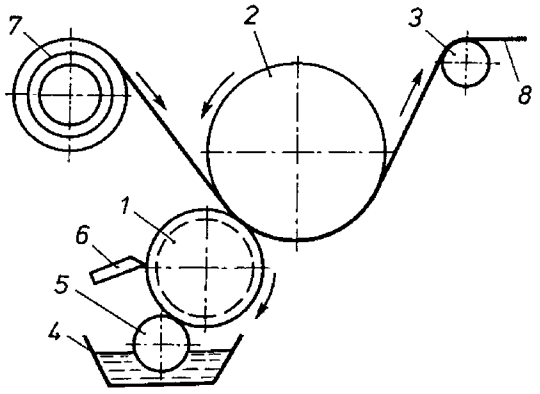


Rys. 4.47. Schemat drukowania sitowego (sitodruku): a) płaskiego, b) obrotowego; *1* — wzornik płaski (a) lub kołowy (b), *2* — rakiel, *3* — przedmiot drukowany, *4* — rama, *5* — podłoże drukowe (a) bądź cylinder drukowy kołowy (b)

wzornik kołowy i cylinder drukowy kołowy, ruch liniowy wykonuje przedmiot (na ogół taśma), a rakiel jest nieruchomy. W obu przypadkach rakiel miesza i przeciska farbę przez miejsca przepuszczalne we wzorniku sitowym.

Drukowanie wklęsłe

Istota drukowania wklęsłego (wklęsłodruku) polega na przeniesieniu farby graficznej na powierzchnię przedmiotu z wklęsłych miejsc powierzchni roboczej formy drukowej. W procesie drukowania najpierw powleka się farbą całą powierzchnię roboczą form, a następnie jej nadmiar zgarnia się z wierzchołków nierówności powierzchni. W wyniku docisku przedmiotu farba z zagłębień powierzchni formy jest przenoszona na przedmiot (rys. 4.48). Drukowanie wklęsłe stosuje się głównie



Rys. 4.48. Schemat drukowania wklęsłego obrotowego: *1* — forma drukowa (cylinder formowy), *2* — cylinder drukowy, *3* — walec prowadzący, *4* — kałamarz z farbą, *5* — walec pośredniczący, *6* — rakiel, *7* — walec podający tworzywo, *8* — folia lub wstęga drukowana

do folii, wstęg oraz arkuszy z tworzyw i przeprowadza za pomocą *drukarek obrotowych*. W tych przypadkach forma drukowa ma kształt walca. Wykonuje się ją na ogół z metali, a żądane znaki i obrazy na powierzchni formy uzyskuje się dość złożonymi zabiegami chemigraficznymi [4.42, 4.54]. Najistotniejszą cechą drukowania wklęsłego jest możliwość uzyskania wielu odcieni tej samej barwy, co następuje w wyniku różnic głębokości miejsc wklęsłych formy.

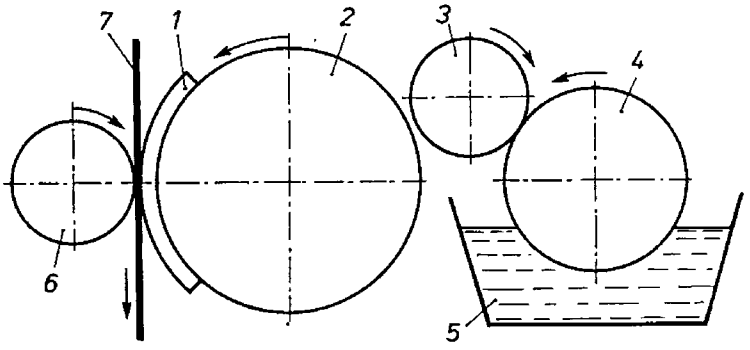
Znanych jest kilka technik drukowania wklęsłego, z których na skalę przemysłową stosuje się głównie *drukowanie rotograwiurowe*. Wykonanie formy do tego drukowania wymaga kilku zabiegów chemigraficznych, przede wszystkim: sporządzania diapozytywów, retuszu, montażu, kopiowania i trawienia. Drukowanie wklęsłe może być jedno- lub wielokolorowe. Do drukowania wielokolorowego stosuje się kilka drukarek, na ogół ustawionych szeregowo, z których każda drukuje innym kolorem. Można również stosować w tym celu jedną drukarkę, wyposażoną w kilka form — każda do innego koloru. Drukowanie wklęsłe jest dość szeroko stosowane.

Drukowanie wypukłe

Istota tego drukowania polega na przeniesieniu farby graficznej na powierzchnię przedmiotu z wypukłych miejsc powierzchni roboczej formy drukowej. W procesie drukowania powleka się farbą tylko miejsca wypukłe powierzchni formy, co powoduje, że otrzymane znaki lub obrazy mają ostre zarysy. Drukowanie wypukłe stosuje się, podobnie jak drukowanie wklęsłe, przede wszystkim do folii, wstęg oraz arkuszy z tworzyw i przeprowadza się je przy użyciu drukarek obrotowych. Drukowanie wypukłe może być typograficzne i fleksograficzne.

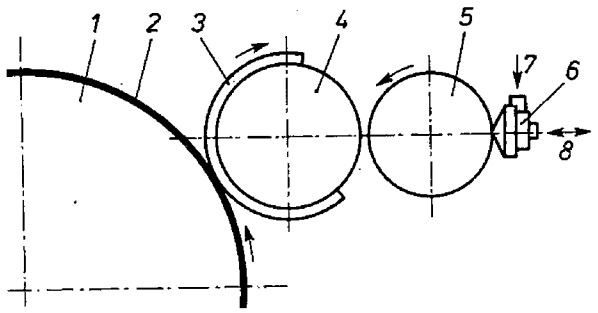
Drukowanie wypukłe typograficzne jest najstarszą ze wszystkich odmian drukowania. Forma drukowa ma kształt płyty lub walca. Wykonuje się ją z metali, a żądane znaki lub obrazy na powierzchni formy uzyskuje się dość złożonymi zabiegami chemigraficznymi. Stosuje się również składy z czcionek złożonych ręcznie lub maszynowo.

Drukowanie wypukłe fleksograficzne przeprowadza się za pomocą formy drukowej wykonanej z elastomerów, najczęściej z gumy, lub wykonanej z fotopolimerów, przymocowanej (na ogół przyklejonej) do elementu metalowego. Używa się farb szybko schnących, np. spirytusowych i wodnych, co znacznie ogranicza lub eliminuje emisje rozpuszczalników organicznych do atmosfery [4.93]. Schemat drukowania fleksograficznego obrotowego arkuszy pokazano na rys. 4.49, a schematy drukowania



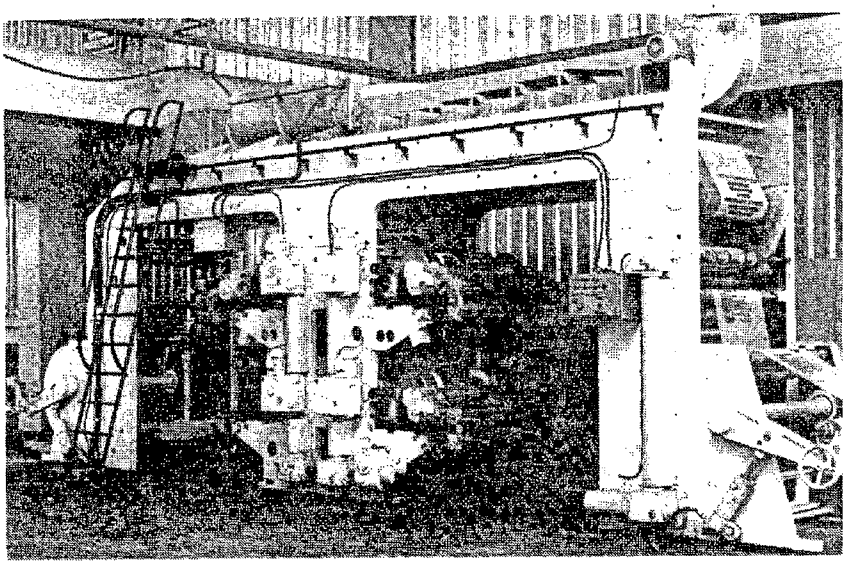
Rys. 4.49. Schemat drukowania fleksograficznego obrotowego: *1* — forma drukowa, *2* — cylinder formowy mocujący formę, *3* — walec nanoszący, *4* — walec pośredniczący, *5* — kałamarz z farbą, *6* — cylinder drukowy, *7* — arkusz drukowany

folii i wstęg są podane w literaturze [4.27, 4.54, 4.103]. Drukowanie fleksograficzne może być również prowadzone bez użycia kałamarza z farbą [4.27]; wówczas to farbę doprowadza się do rakla mającego komorę wzdłużną z regulowaną szczeliną między nim a walcem pośredniczącym (rys. 4.50). Takie zalety drukowania fleksograficznego, jak [4.10, 4.102]: stosunkowo szybkie i tanie wykonanie form drukowych, efektywne stosowanie farb wodnych i mała energochłonność drukowania sprawiają, że jest ono coraz szerzej stosowane, zwłaszcza na opakowaniach [4.65]. Do wad zalicza się



Rys. 4.50. Schemat drukowania fleksograficznego bez użycia kałamarza z farbą: *1* — cylinder drukowy, *2* — folia lub wstęga drukowana, *3* — forma drukowa, *4* — walec formowy, *5* — walec pośredniczący, *6* — rakiel komorowy, *7* — doprowadzenie farby, *8* — regulacja położenia rakla komorowego

niewielką „liniaturę" znaków i obrazów rastrowych (24÷36 linii/cm) i ograniczoną, zwykle do 6, liczbę kolorów. Przeważają zdecydowanie zalety. *Drukarki fleksograficzne* są maszynami złożonymi o stosunkowo dużych rozmiarach. Ich produkcją zajmują się znane firmy, np. Cuper Printing (USA), Strachan Henshaw (Anglia), Carraro (Włochy) i Windmölscher und Hölscher (Niemcy). W Polsce problematyką drukowania fleksograficznego zajmuje się OBR Metalchem w Toruniu, gdzie m.in. opracowano drukarkę fleksograficzną D-76M (rys. 4.51) o prędkości drukowania folii do 1,67 m/s, grubości 0,1÷0,3 mm, jedno- i dwustronnie w jednym, dwóch, trzech i czterech kolorach.



Rys. 4.51. Wygląd ogólny drukarki fleksograficznej D-76M

Drukowanie płaskie

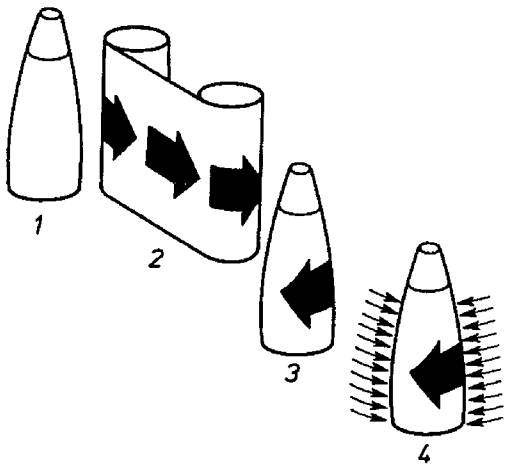
W odróżnieniu od drukowania wklęsłego i wypukłego drukowanie płaskie polega na przeniesieniu farby graficznej na powierzchnię przedmiotu z określonych miejsc powierzchni roboczej formy drukowej, nie mającej celowo ukształtowanych wierzchołków i wgłębień odpowiadających żądanym znakom lub obrazom. Drukowanie to może być rozwiązane tak, że elementy drukujące są hydrofobowe, pozostała zaś powierzchnia robocza formy ma właściwości hydrofilowe. Przy drukowaniu stosuje się wodę i tłustą farbę. Farbę przenoszą tylko te miejsca, do których następuje przywarcie farby, czyli miejsca hydrofobowe. Najczęściej formę stanowi cienka płyta cynkowa lub rzadziej aluminiowa z odpowiednią powierzchnią roboczą, z której znaki lub obrazy są

odwzorowywane za pośrednictwem walca elastomerowego (np. gumowego); tego rodzaju drukowanie płaskie nosi nazwę *drukowania offsetowego*. Przy drukowaniu offsetowym znaki lub obrazy na formie nie są odwrócone.

Drukowanie kombinowane

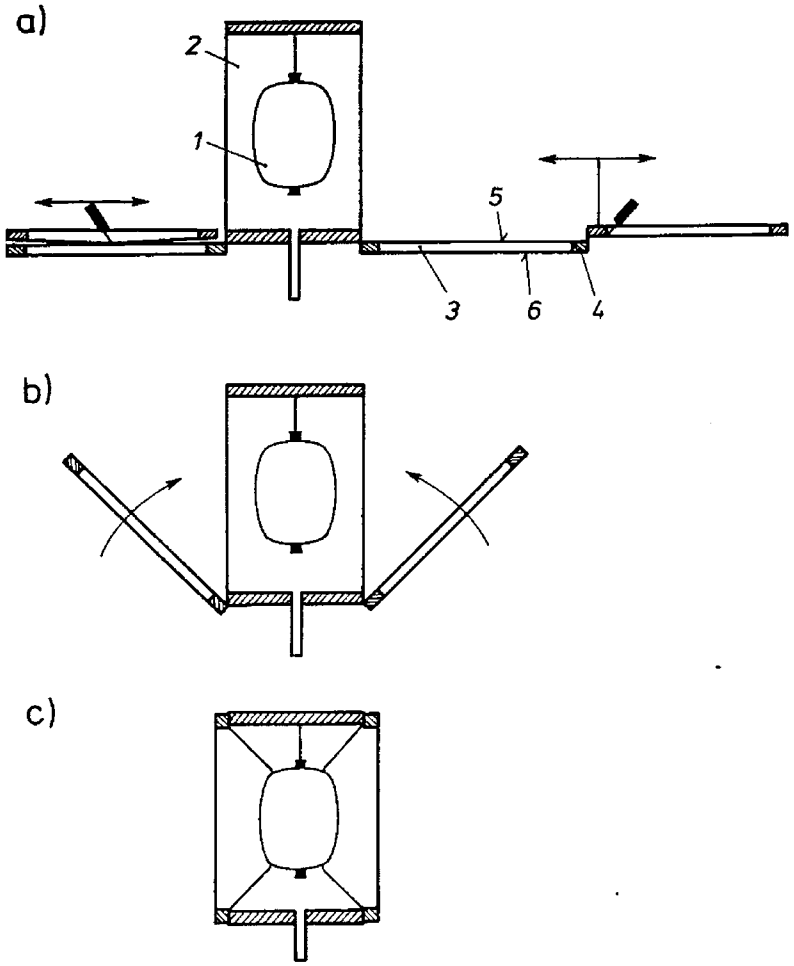
Podstawową cechą drukowania kombinowanego jest połączenie co najmniej dwóch odmian drukowania klasycznego. Znanych jest oczywiście wiele możliwości takich połączeń, ale rozpowszechnienie znalazło połączenie drukowania wypukłego z drukowaniem offsetowym, zwane *drukowaniem przez przenoszenie* oraz połączenie sitodruku z drukowaniem offsetowym, zwane *przedrukiem*. Drukowanie kombinowane stosuje się przede wszystkim do różnych wyprasek wtryskowych i prasowniczych, przedmiotów otrzymywanych poprzez wytłaczanie lub wtryskiwanie z rozdmuchiwaniem itp.

W przypadku drukowania przez przenoszenie (rys. 4.52) żądane znaki i obrazy nanosi się techniką drukowania wypukłego na specjalną taśmę, którą pokrywa się warstwą reaktywną, i przenosi w dowolnym czasie do drugiego stanowiska technologicznego. Tam warstwę aktywuje się poprzez nagrzewanie lub poddanie działaniu mgły rozpuszczalnika, po czym na skutek dociśnięcia taśmy do powierzchni przedmiotu i następnie oddzielenia jej, znaki lub obrazy przenoszą się (drukowanie offsetowe) na powierzchnię przedmiotu.



Rys. 4.52. Schemat drukowania przez przenoszenie: *1* — przedmiot przed drukowaniem, *2* — zadrukowana taśma, *3* — przedmiot z naniesionymi znakami lub obrazami, *4* — utrwalanie cieplne druku [4.103]

Na rysunku 4.53 przedstawiono schemat przedruku. Przedmiot drukowany (*1*) zawiesza się w komorze (*2*) otwartej z dwóch stron. Z każdej z tych stron znajduje się odchylna płyta (*3*), z ramą (*4*). Część górną (*5*) płyty tworzy przedmiot do sitodruku, natomiast część dolną (*6*) stanowi przepona elastomerowa (często gumowa). Po wykonaniu sitodruku płyty obraca się o kąt $(\pi/2)$ rad i zamyka szczelnie z komorą. Podczas wytwarzania podciśnienia we wnętrzu komory część zadrukowana jest dociskana przeponą do powierzchni przedmiotu, co powoduje drukowanie offsetowe.



Rys. 4.53. Schemat przedruku: a) drukowanie sitowe, b) zamykanie płyt z komorą, c) drukowanie offsetowe: oznaczenia w tekście [4.103]

4.6. Metalizowanie

W niniejszym rozdziale (p. 4.2) przedstawiono nanoszenie tworzyw na powierzchnie przedmiotów przede wszystkim metalowych, ale można postępować odwrotnie, tj. nanosić metale na powierzchnie przedmiotów z tworzyw, czyli metalizować je. Powłoki metalowe na powierzchnie tworzyw nanosi się w celu polepszenia niektórych właściwości mechanicznych, zwłaszcza wytrzymałości i udarności, elektrycznych — uzyskania powierzchni lub ścieżek przewodzących, optycznych — zwiększenia zdolności odbijania promieniowania (refleksyjności), chemicznych — ochrony przed działaniem wody, pary i innych czynników, oraz wreszcie nanosi się je w celach dekoracyjnych. Powłoki metalowe nanosi się również, aby nadać właściwości barierowe wieloskładnikowym wytworom foliowym. Metalizowanie, choć stosowane od dawna, nie ma tak bogatej literatury, jak nanoszenie. Z obszerniejszych opracowań w języku polskim można wymienić zaledwie kilka [4.44, 4.54, 4.99, 4.103], a prace badawczo-rozwojowe w zakresie metalizowania prowadzono głównie w Instytucie Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie.

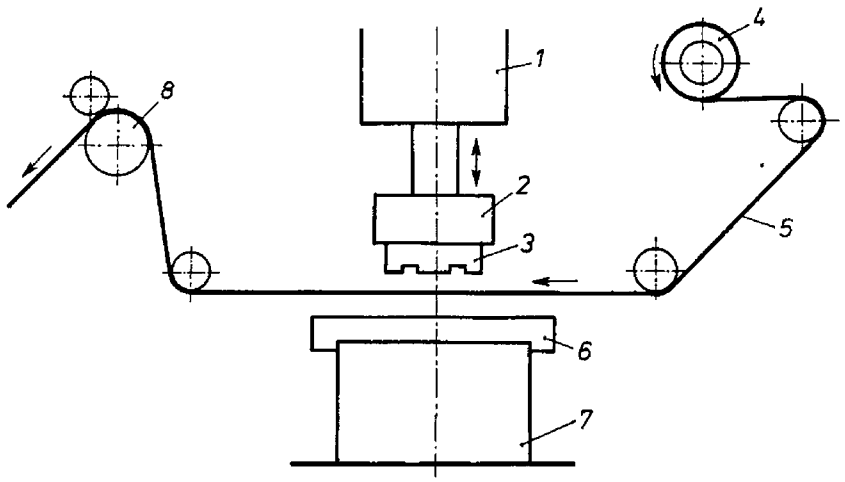
Metalizowaniu poddaje się przedmioty wykonane innymi metodami przetwórstwa, zarówno z tworzyw termoplastycznych, jak i utwardzalnych. Jako metale powłokowe

stosuje się głównie aluminium, miedź, nikiel, srebro, cynk, cynę, złoto, chrom, kobalt. Warstwę wierzchnią przedmiotów, którą zamierza się metalizować, przygotowuje się w sposób zapewniający odpowiednią adhezję. Znanych jest kilka odmian metalizowania. Istotne znaczenie ma metalizowanie folią (wciskanie, foliowanie), metalizowanie natryskowe, zanurzeniowe, próżniowe i elektrochemiczne.

4.6.1. Metalizowanie folią

Metalizowanie folią, zwane też *wciskaniem* lub *foliowaniem*, polega na wywarciu nacisku elementem nagrzanym na specjalną folię, nałożoną na przygotowaną powierzchnię tworzywa — w tym miejscu folia przylega adhezyjnie do powierzchni tworzywa. Stosowana do metalizowania folia ma grubość kilkunastu μm i składa się z kilku złączonych warstw: warstwy nośnej, która nie wchodzi w skład nanoszonego metalu, oddzielającej (barwnej), metalowej (najczęściej aluminiowej) i klejowej. Folia zwrócona jest do powierzchni tworzywa warstwą klejową. Elementami wywierającymi nacisk mogą być: stempel i matryca o różnych kształtach bądź dwa walce o rozmaitych tworzących, wykonane ze stali lub tworzyw, np. gumy silikonowej. Temperatura elementu wywierającego nacisk zwykle nie przekracza 150°C. Metalizowanie folią jest coraz częściej stosowane, szczególnie do nanoszenia ozdób, znaków i napisów. W tych ostatnich przypadkach bywa [4.103], że zalicza się je niesłusznie do drukowania.

Na rysunku 4.54 przedstawiono schemat jednego z rozwiązań procesu metalizowania folią, wówczas gdy przedmiot metalizowany jest płaski lub zbliżony do płaskiego, natomiast na rys. 4.55 schemat procesu, gdy przedmiot ma kształt walcowy bądź stożkowy, a folia ma być przeniesiona w ściśle określone miejsce położone na przedmiocie.

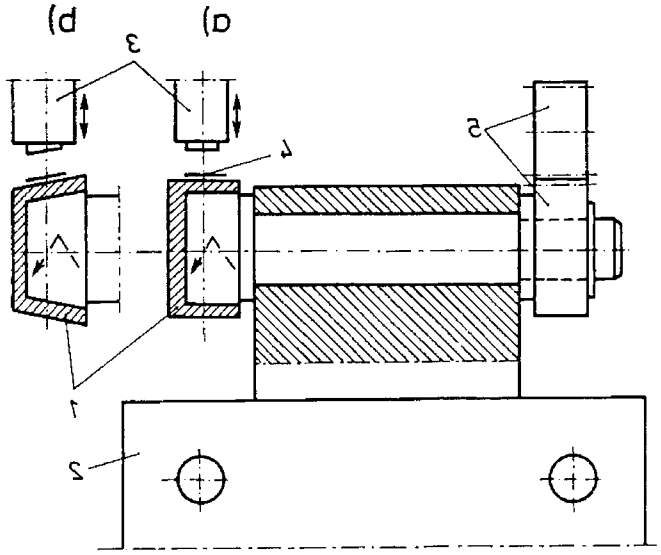


Rys. 4.54. Schemat procesu metalizowania folią przedmiotów płaskich: *1* — prasa, *2* — głowica z grzejnikiem elektrycznym, *3* — stempel o kształtowej powierzchni roboczej, *4* — walec podający folię, *5* — folia, *6* — przedmiot metalizowany, *7* — uchwyt przedmiotu, *8* — walec napędzający folię

4.6.2. Metalizowanie natryskowe i zanurzeniowe

Metale mogą być natryskiwane na powierzchnie przedmiotów z tworzyw bezpośrednio lub pośrednio.

Metalizowanie natryskowe bezpośrednie polega na stopieniu metalu w pistolecie



Rys. 4.55. Schemat procesu metalizowania folią przedmiotów: a) walcowych, b) stożkowych; *1* — przedmiot metalizowany, *2* — podstawa uchwytu przedmiotu, *3* — stempel o odpowiedniej powierzchni roboczej, *4* — folia, *5* — przekładnia zębata napędu przedmiotu, zapewniająca ściśle określone jego położenie w chwili metalizowania

natryskowym, rozpyleniu i przeniesieniu go za pośrednictwem sprężonego powietrza na przygotowaną powierzchnię przedmiotu z tworzywa, gdzie kończy się proces jego krzepnięcia. Istota tego procesu jest więc taka sama, jak metalizowania natryskowego metali [4.63]. Można stosować zarówno *metalizowanie gazowe*, gdy źródłem ciepła stapiającego nanoszony metal jest płomień podczas spalania gazu palnego, np. acetylenu, jak również *elektrometalizowanie*, gdy źródłem ciepła jest łuk elektryczny. Aby nie nastąpił rozkład cieplny warstwy wierzchniej tworzywa, do metalizowania stosuje się głównie metale o niskiej temperaturze topnienia, np. cynę lub cynk [4.21], natomiast podczas nanoszenia metali o wysokiej temperaturze topnienia, natryskuje się je na uprzednio naniesioną i ochłodzoną warstwę metali niskotopliwych. Za pomocą metalizowania natryskowego bezpośredniego otrzymuje się powłoki porowate, szorstkie i dość grube (50÷100 μm), dające się szlifować i polerować.

Metalizowanie natryskowe pośrednie, zwane też *roztworowym*, przeprowadza się poprzez jednoczesne natryskiwanie na przygotowaną powierzchnię przedmiotu, za pomocą pistoletów pneumatycznych, roztworu soli metalu, głównie azotanu srebra $AgNO_3$, i roztworu związku redukującego metal. W wyniku reakcji chemicznej wydziela się metal, pozostając na powierzchni przedmiotu. Można do tego celu stosować również jeden pistolet, ale z dwoma dyszami. Powłoka jest stosunkowo cienka (5÷20 μm) i bardzo błyszcząca.

Metalizowanie zanurzeniowe polega na zanurzeniu przedmiotu na określony czas w odpowiednich ciekłych związkach chemicznych. W czasie zanurzenia zachodzi reakcja chemiczna powodująca wydzielanie się metalu pozostającego na przygotowanej powierzchni przedmiotu. Większe znaczenie mają następujące procesy [4.99].

— *Srebrzenie*, do którego stosuje się roztwór soli srebra, a następnie soli o właściwościach redukujących. Można też stosować alkoholowy lub acetonowy roztwór azotanu srebra $AgNO_3$, a potem wodorosiarczyn sodu $NaHSO_3$.

— *Miedziowanie*, wymagające wstępnego aktywowania powierzchni przedmiotu siarczkiem tytanu TiS_2, a następnie roztworem kwasu chloroplatynowego H_2PtCl_6. Aby na powierzchni przedmiotu osadzić miedź, zanurza się go w kąpieli otrzymanej przez redukcję roztworu Fehlinga metaloorganicznymi pochodnymi wodorosiarczynu sodu.

— *Niklowanie*, które przeprowadza się zanurzając przedmiot w roztworze chlorku niklu(II) $NiCl_2$, podfosforynu sodu NaH_2PO_2, chlorku amonu NH_4Cl i cytrynianu sodu $Na_3C_6H_5O_7$ (o wskaźniku pH = 8÷9) zredukowanych za pomocą amoniakalnego roztworu wodorosiarczynu sodu $NaHSO_3$. Jako katalizatory stosuje się często hydrazynę lub platynę [4.66].

4.6.3. Metalizowanie próżniowe

Istotą metalizowania próżniowego jest kondensowanie par metalu na powierzchni przedmiotu z tworzywa i jego adhezyjne wiązanie z tą powierzchnią. Przeprowadza się je w urządzeniu do metalizowania, w którego komorze próżniowej wytwarza się niskie ciśnienie (tabl. 4.6) określonego gazu, a metal używany do nanoszenia umieszcza się

Tablica 4.6

Ciśnienie gazu w komorze próżniowej

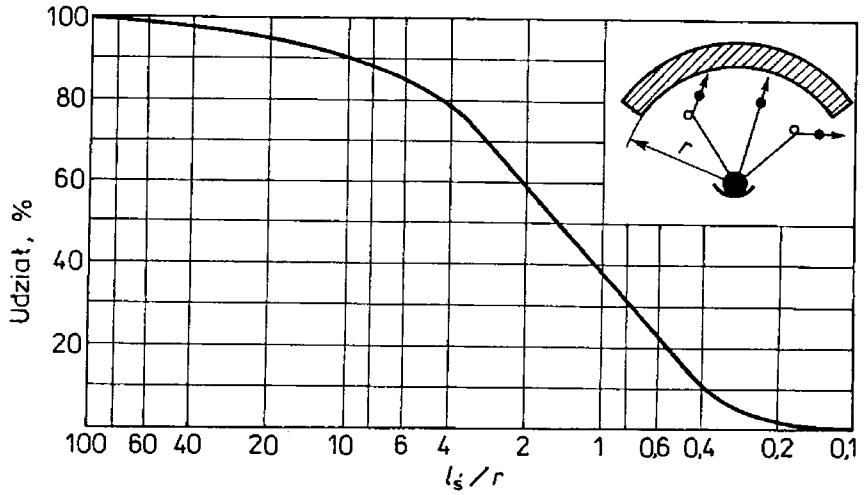
Zakres wartości, Pa	Nazwa
101 080÷133	ciśnienie obniżone
133÷0,133	próżnia wstępna
0,133÷$1{,}33\cdot10^{-4}$	próżnia wysoka
poniżej $1{,}33\cdot10^{-4}$	próżnia bardzo wysoka

w parowniku — na przewodzie rezystancyjnym z metalu o wysokiej temperaturze topnienia, np. z wolframu lub molibdenu, bądź w tyglu wykonanym z takiego metalu, ogrzewanym elektrycznie do temperatury parowania, która ze względu na małe ciśnienie jest stosunkowo niska. Cząsteczki parującego metalu rozchodzą się z powierzchni topionego metalu, z prędkością ponad 100 m/s, wzdłuż linii prostych we wszystkich kierunkach, tworząc molekularny strumień pary. Cząsteczki te natrafiają w zasięgu swojej drogi na powierzchnię przedmiotu o temperaturze znacznie niższej niż ich temperatura własna. Zatem kondensują się w kształcie równomiernej warstwy, o grubości zależnej od ciśnienia w komorze, czasu kondensowania, temperatury tworzywa i odległości od źródła parowania.

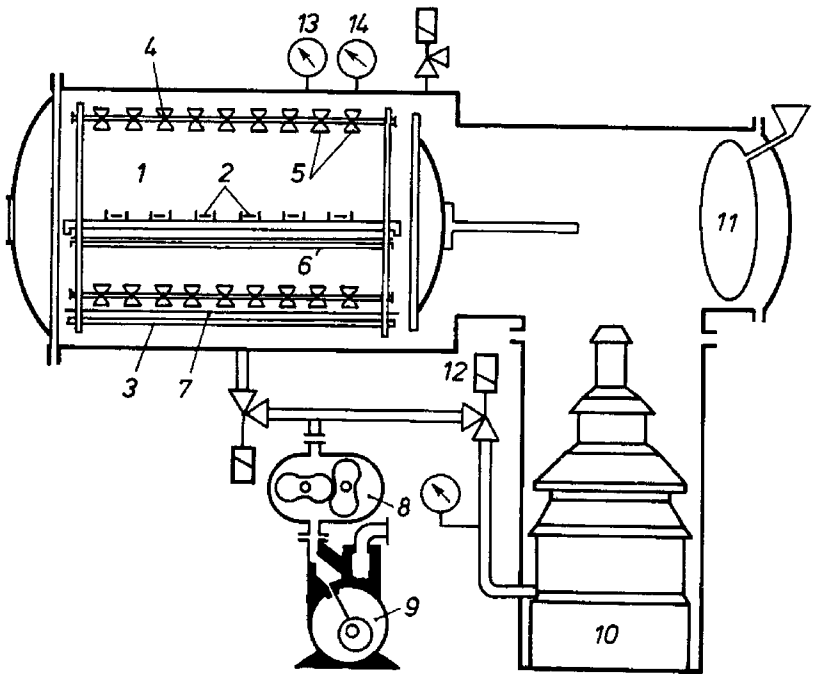
Ale część cząsteczek metalu zderza się z cząsteczkami gazu znajdującego się w komorze oraz ze ściankami komory, co powoduje niepożądane reakcje chemiczne i zmiany kierunku ruchu cząsteczek, prowadzące do pogorszenia jakości powłok, przede wszystkim zmatowienia. Liczba cząsteczek gazu, z którymi mogą zachodzić zderzenia, zależy głównie od ciśnienia gazu. Wielkością charakteryzującą prawdopodobieństwo zderzeń jest średnia długość $l_ś$ drogi swobodnej cząsteczki gazu, która dla powietrza, azotu, tlenu i argonu może być przybliżana wzorem doświadczalnym [4.103]

$$l_{ś} = \frac{6{,}67}{p} \tag{4.39}$$

w którym p oznacza ciśnienie gazu w komorze wyrażone w Pa, przy $l_{ś}$ wyrażonym w mm. Inną wielkością charakteryzującą jest stosunek $l_{ś}/r$, gdzie r oznacza najmniejszą odległość źródła parowania od powierzchni przedmiotu (rys. 4.56). W procesie metalizowania ciśnienie gazu spada samorzutnie, gdyż pary metalu wiążą gaz, co jest równoznaczne z procesem odpompowywania gazu. Na przykład w określonej próżni wysokiej ciśnienie gazu może spaść samorzutnie do wartości około 10^{-3} Pa i wówczas $l_{ś}/r = 5$, a więc 82% cząsteczek metalu nie ulega zderzeniom z cząsteczkami gazu.

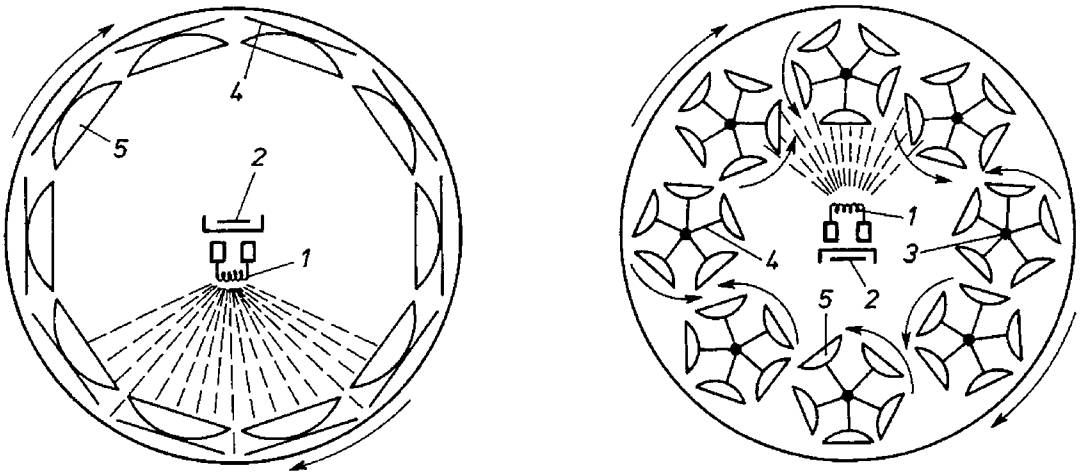


Rys. 4.56. Udział procentowy cząsteczek pary metalu wychodzących ze źródła parowania i nie ulegających zderzeniom z cząsteczkami gazu w komorze w zależności od stosunku $l_{ś}/r$ [4.103]



Rys. 4.57. Schemat urządzenia do cyklicznego metalizowania próżniowego: 1 — komora próżniowa, *2* — parowniki, *3* — bęben załadowczy, *4* — uchwyty, *5* — przedmioty metalizowane, *6* — elektroda jarzeniowa, *7* — prowadnice bębna, *8* — pompa Rootsa, *9* — pompa próżni wstępnej, *10* — pompa dyfuzyjna, *11* — wymrażarka, *12* — zawór próżni wstępnej, *13* i *14* — przyrządy do pomiaru ciśnienia

Urządzenie do metalizowania próżniowego (rys. 4.57) składa się z komory próżniowej (*1*), parowników (*2*), bębna załadowczego (*3*), zwanego też klatką załadowczą, z uchwytami (*4*) do mocowania przedmiotów metalizowanych (*5*), elektrody jarzeniowej (*6*), prowadnic bębna (*7*), pompy Rootsa (*8*), pompy próżni wstępnej (*9*), pompy dyfuzyjnej (*10*) do próżni wysokiej i bardzo wysokiej oraz wymrażarki (*11*). Przedmioty mocuje się w uchwytach na wysuniętym z komory bębnie. Załadowany bęben wsuwa się do komory, komorę zamyka, wytwarza próżnię wstępną i przedmioty poddaje procesowi wyładowania jarzeniowego aktywującego warstwę wierzchnią przedmiotów. Aby całkowicie pokryć przedmioty metalem, zostają one wprawiane w ruch obrotowy wokół osi bębna, wokół własnych osi lub osi

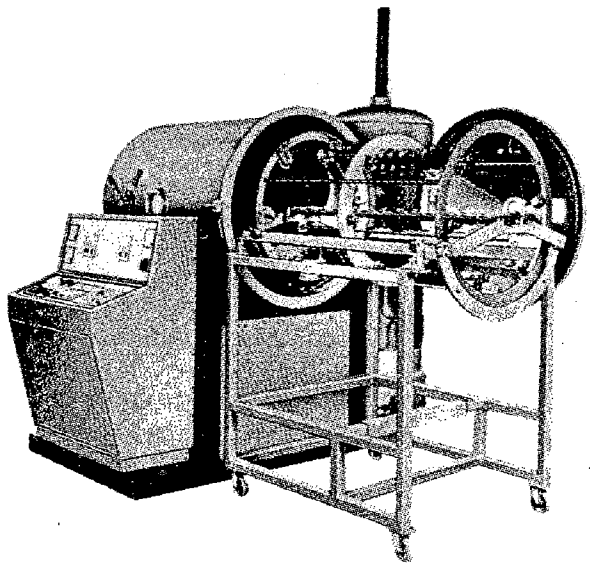


Rys. 4.58. Schematy przekroju poprzecznego bębna załadowczego z zaznaczonymi ruchami przedmiotów metalizowanych: *1* — parownik, *2* — elektroda jarzeniowa, *3* — pręty obrotowe uchwytów przedmiotów, *4* — uchwyty, *5* — przedmioty

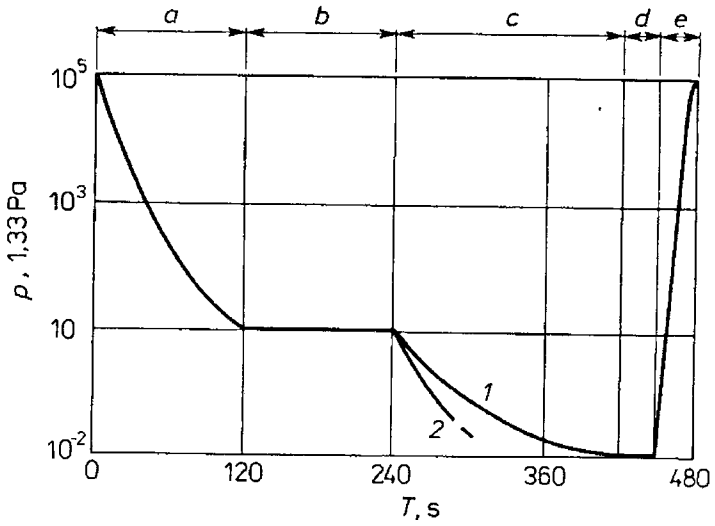
uchwytów, a często w dwóch ostatnich przypadkach (gdy powierzchnie są bardziej złożone) również wokół osi bębna (rys. 4.58). Próżnię wysoką lub bardzo wysoką uzyskuje się za pomocą trój- lub czterostopniowej pompy dyfuzyjnej olejowej. Zadaniem wymrażarki jest usunięcie par i gazów, zwłaszcza pary wodnej, które mogły ulec desorpcji z warstwy wierzchniej przedmiotów. Na rysunku 4.59 przedstawiono wygląd ogólny urządzenia do metalizowania próżniowego z wysuniętym bębnem załadowczym.

Proces metalizowania próżniowego przedmiotów jest cykliczny. W skład cyklu wchodzą następujące fazy: załadowanie bębna i zamknięcie komory — odpompowanie wstępne, obniżanie ciśnienia, wytworzenie próżni wstępnej — wyładowanie jarzeniowe — odpompowanie zasadnicze, wytworzenie próżni wysokiej i bardzo wysokiej — parowanie i kondensacja — wpuszczenie gazu — otwarcie komory, rozładowanie bębna, przerwa technologiczna. Wartość ciśnienia gazu w komorze zmienia się istotnie w poszczególnych fazach (rys. 4.60). Jako gaz w zdecydowanej większości przypadków stosuje się powietrze atmosferyczne. Na ogół niezbędne ciśnienie, przy którym przebiega zadowalająco proces parowania i kondensacji, wynosi $1{,}33 \cdot 10^{-2}$ Pa.

Duże znaczenie ma metalizowanie próżniowe wstęg, zwłaszcza folii. Odbywa się ono w sposób ciągły w urządzeniu jednokomorowym, co jest rozwiązaniem starszym [4.27, 4.99], lub wielo- np. czterokomorowym (rys. 4.61).

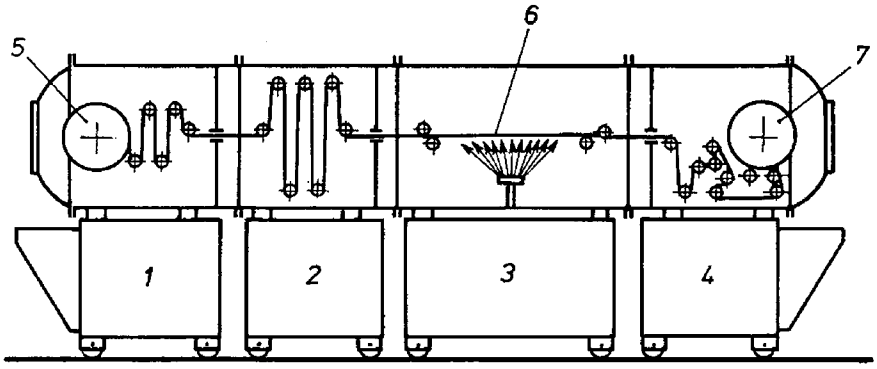


Rys. 4.59. Wygląd ogólny urządzenia do cyklicznego metalizowania próżniowego z wysuniętym z komory próżniowej bębnem załadowczym (Satis Vacuum AG, Szwajcaria)



Rys. 4.60. Zależność ciśnienia p gazu w komorze próżniowej od czasu T poszczególnych faz procesu metalizowania próżniowego (przykład): *a* — odparowanie wstępne, *b* — wyładowanie jarzeniowe, *c* — odpompowanie zasadnicze, *d* — parowanie i kondensacja, *e* — wpuszczenie gazu do komory; *1* — przebieg krzywej przy niezbędnym ciśnieniu gazu w fazie parowania i kondensacji, *2* — przebieg krzywej przy ciśnieniu niższym

Największą zaletą metalizowania próżniowego jest możliwość uzyskania powłok bardzo cienkich, nawet niekiedy nie przekraczających 0,03 μm. Ma to duże znaczenie ze względu na koszty, np. w przypadku powłok złotych. Do wad tego metalizowania zalicza się konieczność stosowania tworzyw wydzielających znikomą ilość gazów i par, ograniczenia rozmiarów elementów metalizowanych wynikające z rozmiarów komory próżniowej, jak również pewne trudności eksploatacyjne urządzeń, np. trudności uszczelniania.



Rys. 4.61. Schemat urządzenia do ciągłego metalizowania próżniowego folii: *1* — komora do odwijania folii, *2* — komora pośrednia, *3* — komora próżniowa, *4* — komora do nawijania folii metalizowanej, *5* — walec wprowadzający, *6* — folia metalizowana, *7* — walec odbierający

4.6.4. Metalizowanie elektrochemiczne

Metalizowanie elektrochemiczne, zwane też *galwanizowaniem,* polega na elektrolitycznym nanoszeniu metalu na powierzchnię przedmiotu z tworzywa, pokrytą uprzednio warstwą przewodzącą prąd elektryczny, związaną adhezyjnie z tą powierzchnią. Warstwę elektroprzewodzącą otrzymuje się za pomocą jednej z przedstawionych już odmian metalizowania. Proces nanoszenia metalu przeprowadza się zwykle w wannach wypełnionych określonym *elektrolitem* (tabl. 4.7). Pod wpływem prądu

Tablica 4.7

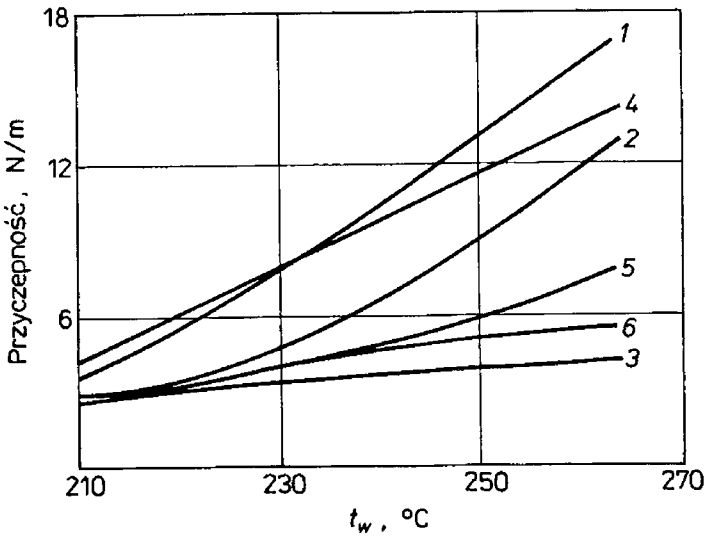
Skład niektórych elektrolitów i warunki metalizowania elektrochemicznego tworzyw [4.54]

Nazwy składników i warunki metalizowania	Rodzaj elektrolitu — skład, g			
	miedziany do zaciągania	miedziany do pogrubiania	niklowy matowy	niklowy błyszczący
Siarczan miedzi(II) $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	50÷100	200	—	—
Kwas siarkowy H_2SO_4	1÷2	20÷30	—	—
Siarczan niklu(II) $NiSO_4 \cdot 7H_2O$	—	—	155	150
Siarczan magnezu $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	—	—	75	—
Chlorek niklu(II) $NiCl_2 \cdot 6H_2O$	—	—	10	—
Kwas borny H_3BO_3	—	—	10	25
Siarczan potasu K_2SO_4	—	—	—	9
Siarczan kadmu $CdSO_4$	—	—	—	0,4
p-Toluenosulfonamid	—	—	—	0,5÷1
Woda	1000	1000	1000	1000
Gęstość prądu, A/dm²	0,3	1,5÷2		1÷2
Napięcie prądu, V	2÷4	1÷2	3,5÷4,5	2÷4
Wskaźnik pH	1,8÷3,0			3÷5
Temperatura	20	30÷40	30÷40	

elektrycznego przepływającego przez elektrolit od anody (metal nanoszony) do katody (przedmiot podlegający nanoszeniu), następuje nanoszenie metalu na katodzie zgodnie z prawami Faradaya. Otrzymane powłoki mają grubość 0,3 ÷ 100 μm, dobrą adhezję do powierzchni przedmiotu, dają się łatwo polerować i odznaczają się ładnym metalicznym połyskiem.

Ocenia się [4.3, 4.16], że ponad 90% przedmiotów z tworzyw termoplastycznych metalizowanych elektrochemicznie stanowią przedmioty z terpolimeru ABS, a kilka procent przedmioty z PP i dlatego znaczną uwagę skupia się na metalizowaniu tych dwóch tworzyw.

Terpolimer ABS, jest jak wiadomo zbudowany z trzech polimerów: polibutadienu, polibutadienu szczepionego styrenem i akrylonitrylem oraz kopolimeru styrenu z akrylonitrylem. Polibutadien występuje w kształcie kulek o średnicy nie przekraczającej 1 μm, rozmieszczonych w osnowie składającej się z pozostałych dwu składników. W procesie formowania przedmiotów z ABS zachodzi przemieszczanie polibutadienu w kierunku powierzchni zewnętrznej przedmiotów — w warstwie wierzchniej ma więc większy udział polibutadien. Zależy to od warunków przetwórstwa; one to, przy jednakowych warunkach prowadzenia procesu metalizowania, przede wszystkim wpływają na przyczepność powłoki (rys. 4.62).

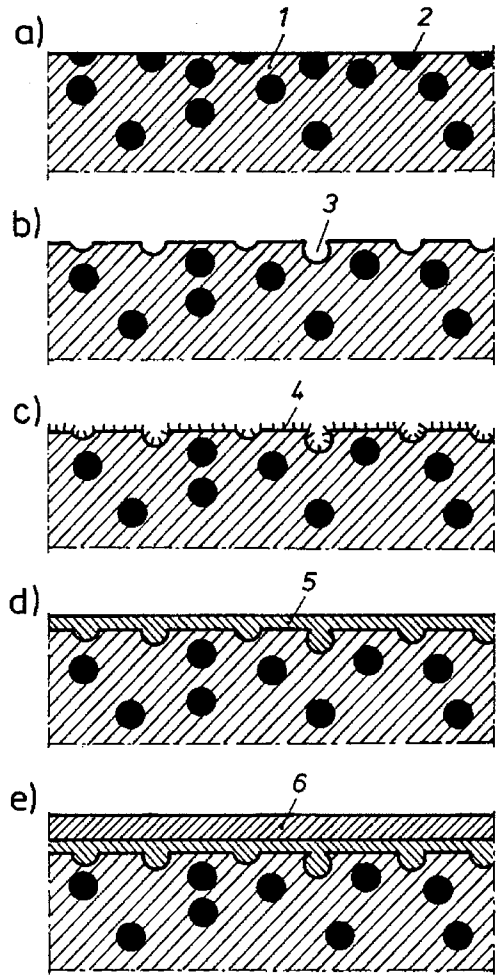


Rys. 4.62. Zależność przyczepności powłoki metalowej od temperatury wtryskiwania t_w, czasu cyklu wtryskiwania i temperatury formy: *1, 2, 3* — temperatura formy 40°C, czas cyklu odpowiednio 10, 5 i 2 s; *4, 5* i *6* — temperatura formy 65°C, czas cyklu jak poprzednio

Proces metalizowania elektrochemicznego ABS obejmuje w istocie następujące operacje technologiczne (rys. 4.63):

— *trawienie* w kąpieli składającej się głównie z kwasu chromowego (wodny roztwór CrO_3), mające na celu rozpuszczenie w strefie przypowierzchniowej polibutadienu, który pozostawia po sobie otwory stanowiące podstawę adhezji mechanicznej nanoszonych następnie warstw;

— *uczulenie* polegające na płukaniu w wodzie i neutralizowaniu w obecności związków palladu jako aktywatora; w czasie neutralizowania niewypłukane ślady chromu sześciowartościowego ulegają redukcji do trójwartościowego;



Rys. 4.63. Zmiany struktury ABS w operacjach metalizowania elektrochemicznego: a) po formowaniu i przed metalizowaniem, b) po trawieniu i uczuleniu, c) po aktywowaniu, d) po metalizowaniu wstępnym, e) po metalizowaniu zasadniczym; *1* — osnowa, *2* — polibutadien, *3* — otwory po polibutadienie, *4* — warstwa metalu szlachetnego, *5* — warstwa miedzi lub niklu, *6* — warstwa metalu naniesiona elektrochemicznie

— *aktywowanie* polegające na osadzeniu w procesie chemicznym na powierzchni wytrawionej i uczulonej małych ilości metalu szlachetnego, w postaci np. soli srebra lub palladu, który stanowi aktywator późniejszego nanoszenia chemicznego metalu;

— *metalizowanie wstępne* odbywające się poprzez zanurzanie w roztworze do miedziowania lub niklowania; aktywator uaktywnia proces chemicznego osadzania się miedzi lub niklu na powierzchni metalu szlachetnego;

— *metalizowanie zasadnicze*, czyli metalizowanie elektrochemiczne, najpierw przy małych gęstościach prądu w celu zaciągania i pogrubienia warstwy już wytworzonej i następnie przy normalnych parametrach nanoszenia warstwy dowolnej, głównie miedziowej, niklowej lub chromowej.

Powłoka naniesiona poprzez metalizowanie elektrochemiczne jest więc wielowarstwowa. Wymienione operacje mogą być łączone i modyfikowane. Na przykład trawienie, uczulenie i aktywowanie łączy się w jedną operację, wykonywaną za pomocą roztworu o specjalnym składzie. W związku z tym procesy metalizowania elektrochemicznego ABS często noszą różne nazwy w zależności od producenta. Metalizowanie elektrochemiczne stosuje się szeroko do elementów samochodowych [4.22], gdzie warstwa naniesiona poprzez metalizowanie zasadnicze zwykle składa się z trzech części (podwarstw): miedzi, niklu i chromu. Grubość warstwy metalu szlachetnego jest pomijalnie mała, grubość warstwy naniesionej metalizowaniem wstępnym wynosi $0{,}5 \div 1{,}3$ μm, natomiast grubość warstwy naniesionej metalizowaniem zasadniczym

w przypadku miedzi wynosi 10÷30 μm, nałożonej na nią warstwy niklu 5÷15 μm i wreszcie nałożonej na nią warstwy chromu 0,3 μm.

Metalizowanie elektrochemiczne, podobnie jak inne odmiany metalizowania, polepsza właściwości mechaniczne przedmiotów, np. znacznie zwiększa współczynnik sprężystości wzdłużnej i wytrzymałość na rozciąganie (tabl. 4.8).

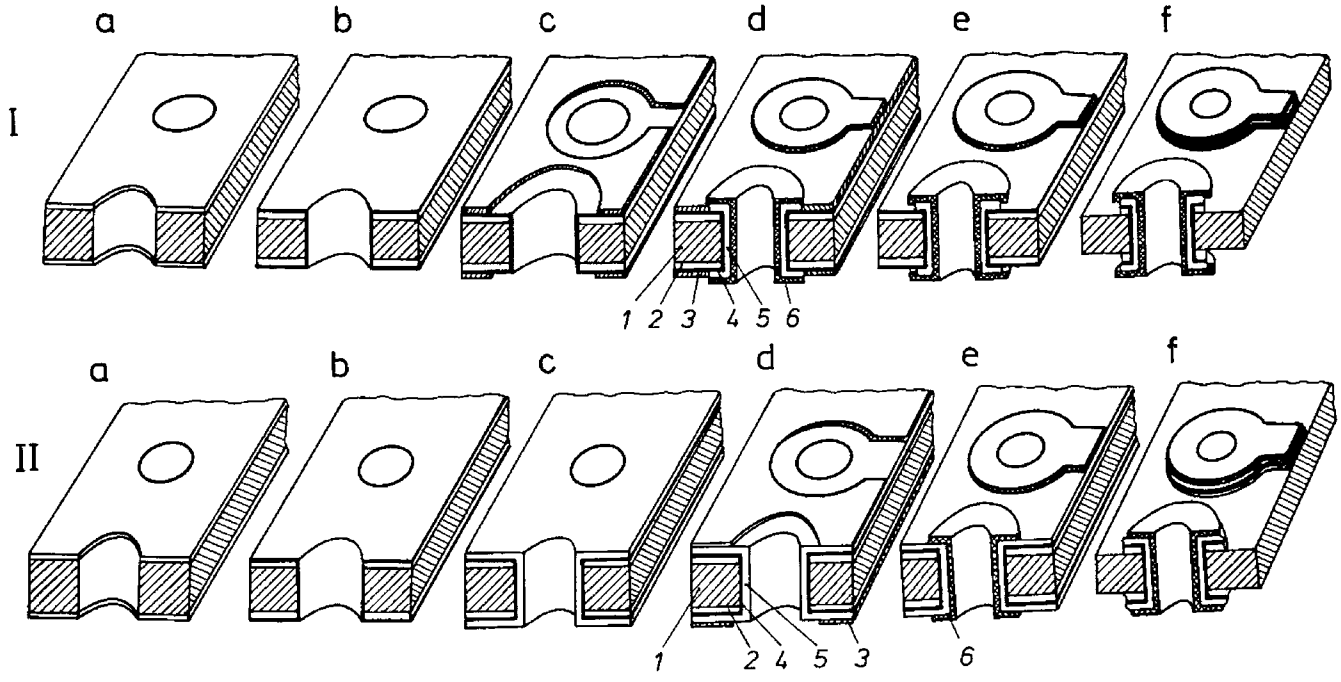
Tablica 4.8

Wpływ metalizowania elektrochemicznego na niektóre właściwości mechaniczne wyprasek ABS [4.3]

Właściwość	Wypraska	
	bez powłoki	z powłoką
Współczynnik sprężystości wzdłużnej, MPa	2136	4214
Wytrzymałość na rozciąganie, MPa	37,8	50,2

Uwaga: Stosowano powłokę trójwarstwową — Cu 30 μm + Ni 15 μm + Cr 0,3 μm; oznaczanie wykonano według ASTM D638 (w temperaturze 23°C).

W przypadku metalizowania elektrochemicznego przedmiotów z PP poddaje się je najpierw trawieniu w kąpieli zawierającej zwykle kwas chromowy; trawienie oddziałuje przede wszystkim na fazę bezpostaciową, niemal nie naruszając sferolitów fazy krystalicznej. W ten sposób w strefie przypowierzchniowej powstają otwory, które są podstawą adhezji mechanicznej nanoszonych następnie warstw. Dalsze postępowanie jest bardzo podobne jak przypadku przedmiotów z ABS.



Rys. 4.64. Schemat wykonywania obwodów drukowanych na płytach laminatów dwustronnie pokrytych folią miedzianą: I — technika substraktywna w odmianie selektywnej, II — technika substraktywna w odmianie kompleksowej, a÷f — poszczególne operacje, opisane w tekście, *1* — laminat foliowany, *2* — folia miedziana, *3* — emulsja (farba) ochronna, *4* — warstwa miedzi osadzonej chemicznie, *5* — warstwa miedzi osadzonej elektrochemicznie, *6* — warstwa metalu ochronnego, np. cynowo-ołowiowa

Metalizowanie elektrochemiczne stosuje się również jako istotny etap przy wytwarzaniu płytek drukowanych, stosowanych w układach elektronicznych. Płytkę stanowi zazwyczaj laminat (np. epoksydowo-szklany) o grubości 0,1 ÷ 6 mm, jedno- lub dwustronnie pokryty folią miedzianą o grubości 5 ÷ 105 μm. Obwody drukowane na płytkach wykonuje się techniką addytywną lub częściej subtraktywną w odmianie selektywnej lub kompleksowej [4.26]. Technika subtraktywna w odmianie selektywnej obejmuje następujące główne operacje (rys. 4.64 część I): wiercenie otworów (a), miedziowanie chemiczne (b), przeniesienie obrazu połączeń drukowanych (c), miedziowanie elektrochemiczne selektywne, uzupełnione metalizowaniem selektywnym ochronnym (d), usuwanie emulsji (farby) ochronnej (e) oraz trawienie wzoru połączeń drukowanych (f). Natomiast w odmianie kompleksowej (rys. 4.64 część II): wiercenie otworów (a), miedziowanie chemiczne (b), miedziowanie chemiczne kompleksowe (c), przeniesienie obrazu połączeń drukowanych (d), metalizowanie selektywne ochronne, uzupełnione usunięciem emulsji (farby) ochronnej (e) oraz trawienie wzoru połączeń drukowanych (f).

4.7. Ulepszanie chemiczne

Istotą ulepszania chemicznego jest wywoływanie w tworzywie reakcji chemicznych, powodowanych oddziaływaniem na tworzywo, w odpowiednich warunkach, określonymi związkami chemicznymi. Reakcje chemiczne przebiegają tylko w warstwie przedmiotu, w której zachodzi dyfuzja zastosowanych związków chemicznych [4.56], powodując zmiany składu chemicznego tworzywa i jego struktury w tej warstwie oraz, co jest tego rezultatem użytkowym — zmiany właściwości całego przedmiotu. Ulepszanie chemiczne nie jest jeszcze dotychczas zbyt szeroko stosowane, ale nabiera coraz większego znaczenia, pozwala bowiem na efektywne polepszanie właściwości przedmiotów z tworzyw, zwłaszcza grubościennych, w zależności od potrzeb, w tym nadawanie im właściwości specyficznych. Stosuje się je bezpośrednio do przedmiotów otrzymanych innymi metodami przetwórstwa, na ogół za pomocą wtryskiwania, wytłaczania, prasowania i odlewania, jako jedną z operacji końcowych, ale niektóre zabiegi ulepszania chemicznego stosuje się również w końcowej fazie procesu otrzymywania tworzyw jako materiałów wejściowych do procesów przetwórstwa — nie będą one jednak bliżej przedstawiane. Ulepszanie chemiczne obejmuje następujące odmiany: chlorowanie, sulfonowanie, chlorosulfonowanie, fluorowanie, sieciowanie i inne.

Chlorowanie

Chlorowanie polega na poddaniu przedmiotów z tworzywa działaniu chloru. Stosuje się je głównie do PE – LD, PE – HD, PP, PVC i PA. Ogólnie ujmując, tworzywa chlorowane odznaczają się głównie zwiększoną odpornością na działanie agresywnych czynników chemicznych, wody i czynników atmosferycznych oraz są mniej palne.

W przypadku chlorowania polietylenu [4.11, 4.74] atomy chloru mogą być wprowadzone do makrocząsteczki w sposób statystyczny lub blokowy. Ponieważ grupy —CHCl— ulegają chlorowaniu o wiele trudniej niż grupy $—CH_2—$, PE

zawierający ponad 70% chloru można w zasadzie traktować jako terpolimer etylenu, chlorku winylu, 1,2-dichloroetylenu. W makrocząsteczce rozgałęzionej najszybciej ulegają podstawieniu chlorem atomy węgla trzeciorzędowego, najtrudniej pierwszorzędowe atomy węgla. Wprowadzenie do 50% chloru całkowicie likwiduje częściowo krystaliczną strukturę wejściową tworzywa, nadając mu charakter elastomeru, ale zwiększenie ilości chloru ponad 60% powoduje, że PE staje się sztywny i twardy. Proces chlorowania PE prowadzi się w rozpuszczalniku organicznym lub zawiesinie wodnej albo rzadziej w złożu stacjonarnym lub fluidalnym. Czynnikami chlorującymi są: gazowy lub ciekły chlor, chloran sodu $NaClO_3$ lub potasu $KClO_3$, niekiedy ICl, natomiast katalizatorami: nadtlenki organiczne, związki azotowe, jod, $AlCl_3$ i $FeCl_3$. Chlorowanie folii powoduje wzrost ich grubości (tabl. 4.9).

Tablica 4.9

Wybrane warunki i rezultaty chlorowania folii PE-LD w temperaturze 20°C [4.77]

Rodzaj środka chlorującego	Stężenie środka chlorującego [mol/dm³]	Stopień podstawienia chlorem, %		Grubość folii, μm	
		po 70 h	po 170 h	przed chlorowaniem	po chlorowaniu
NaClO	0,355	15,92	24,50	48	72
NaClO	0,355	12,96	17,98	173	208
KClO	0,181	5,75	13,30	48	53
KClO	0,181	3,12	8,59	173	178

Uwaga: Stężenie środka chlorującego podano w przeliczeniu na HClO, a grubość folii mierzono w czasie 170 h po chlorowaniu.

Zawartość chloru w polipropylenie zazwyczaj wynosi 17÷26%, nie ulega przy tym naruszeniu izotaktyczna struktura makrocząsteczek i nie zmniejsza się skłonność PP do krystalizacji. Chlorowaniem ataktycznego PP można doprowadzić zawartość w nim chloru do 70%. Proces chlorowania PP prowadzi się w suspensji, roztworze lub w złożu fluidalnym w strumieniu suchego chloru [4.74].

Podczas chlorowania polichlorku winylu atomy wodoru ulegają wymianie na chlor. Największa zawartość chloru w PVC może wynosić 75% — wówczas występują dwa atomy chloru w każdym merze polimeru, a więc ilość chloru jest identyczna jak w polichlorku winylidenu, ale oba tworzywa różnią się znacznie od siebie. Proces chlorowania PVC może być prowadzony w układzie heterogenicznym lub homogenicznym [4.25, 4.53].

Podobna wymiana zachodzi podczas chlorowania poliamidów. Przeprowadza się je poddając przedmioty z PA działaniu wodnego roztworu kwasu podchlorawego HClO lub tetrachloroetanowego roztworu podchlorynu butylu.

Sulfonowanie

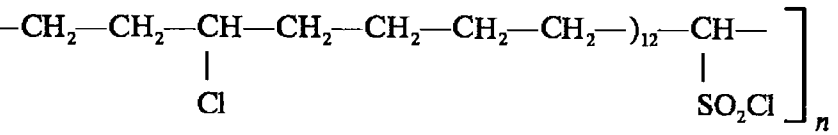
Poddawanie przedmiotów z tworzywa działaniu trójtlenku siarki SO_3 nazywa się sulfonowaniem. Istota sulfonowania nie została jeszcze dokładnie wyjaśniona, ale dotychczas ma ono zastosowanie głównie do polietylenu i polisiarczku fenylenu. W pierwszym przypadku [4.6] sulfonowanie stosuje się w celu ulepszenia warstwy wewnętrznej cystern samochodowych z PE, ale trudno jest połączyć proces roz-

dmuchiwania z procesem sulfonowania. W drugim przypadku [4.50] tworzywo modelowe (PPS + SO_3) stanowi siarczek di-*p*-tolilenu w roztworze kwasu siarkowego. Sulfonowany PPS wykazuje dobre przewodnictwo elektryczne.

Chlorosulfonowanie

Jeżeli przedmioty z tworzywa poddaje się jednoczesnemu działaniu chloru i dwutlenku siarki, to proces taki nosi nazwę chlorosulfonowania. Stosuje się je najczęściej do polietylenu, polipropylenu i polistyrenu.

W przypadku PE–LD proces chlorosulfonowania przeprowadza się za pomocą gazowego chloru i dwutlenku siarki w obecności inicjatora rodnikowego. Polietylen chlorosulfonowany zawiera 27,5% chloru oraz 1,5% siarki, czyli jeden atom chloru przypada na co siódmy atom węgla i jedna grupa SO_2Cl — na co $80 \div 90$ atom węgla [4.74]



(4.40)

Polietylen ten poddaje się sieciowaniu za pomocą diamin reagujących z grupami SO_2Cl. Jest to proces analogiczny do wulkanizowania kauczuku. Dzięki powstaniu struktury usieciowanej, o niedużej liczbie wiązań poprzecznych, tworzywo staje się elastomerem (podobnie jak guma).

Chlorosulfonowanie PP prowadzi się podobnie jak PE, ale wymagana zawartość chloru i siarki niezbędna do nadania tworzywu właściwości elastomeru jest znacznie mniejsza. Poprzez reakcję z $(NH_4)_2CO_3$ uzyskuje się elastomer porowaty. Chlorosulfonowanie PP ułatwia adhezję.

Chlorosulfonowanie PS polega na wprowadzeniu do pierścienia benzenowego podstawnika w postaci grupy chlorosulfonowej, która podlega dalszym przemianom. Trzeba dodać, że podstawnikiem mogą być równie dobrze inne grupy funkcyjne, np. sulfonowe, nitrowe [4.64], chlorometylowe. Wymienione ulepszanie PS nabrało dużego znaczenia w związku z rozwojem wymieniaczy jonowych, czyli jonitów — kationitów i anionitów [4.74, 4.91, 4.100].

Fluorowanie

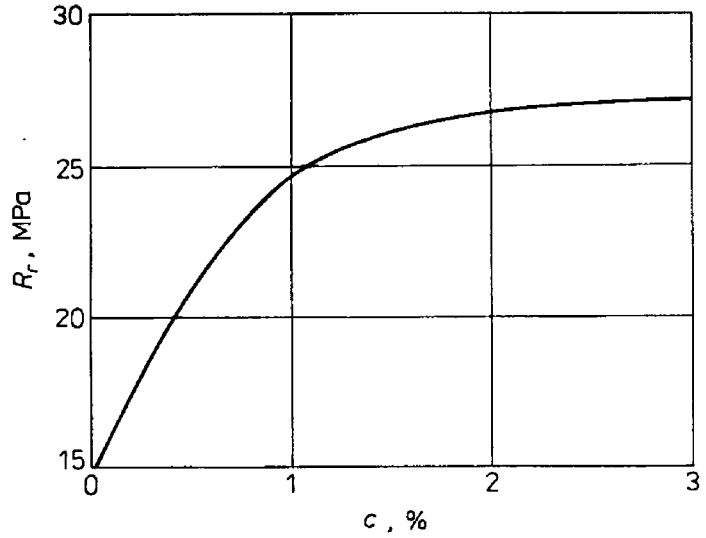
Fluorowanie polega na poddaniu przedmiotów z tworzywa działaniu fluoru. Znalazło ono dotychczas zastosowania głównie do PE, gdzie czynnikiem fluorującym jest gazowy fluor lub gazowa mieszanina fluoru z azotem, a produktem ubocznym fluorowodór HF [4.6]. W firmie Bekum (Niemcy) opracowano fluorowanie warstwy wewnętrznej zbiorników na paliwa samochodowe, połączone z procesem ich rozdmuchiwania. Fluorowane zbiorniki odznaczają się zwiększoną wytrzymałością mechaniczną i odpornością chemiczną m.in. na węglowodory ciekłe.

Sieciowanie

Jak wspomniano w rozdz. 2, p. 2.5.2, proces sieciowania może przebiegać również pod wpływem związków chemicznych, zwanych *inicjatorami sieciowania*. Sieciowanie stosuje się dotychczas głównie do PE oraz PVC.

Do PE [4.69] stosuje się z reguły jako inicjatory sieciowania nadtlenki organiczne; jednym z pierwszych (1958 r.) był nadtlenek benzoilu, natomiast najczęściej stosowany

jest nadtlenek dikumylu, a w mniejszym stopniu nadtlenek *tert*-butylokumylu i nadtlenek di-*tert*-butylu. Proces jest silnie egzotermiczny, ciepło reakcji wynosi bowiem 250÷300 kJ/mol. Rodzaj nadtlenku i jego ilość wpływa na przebieg procesu



Rys. 4.65. Zależność wytrzymałości na rozciąganie R_r usieciowanego PE od zawartości c nadtlenku dikumylu [4.69]

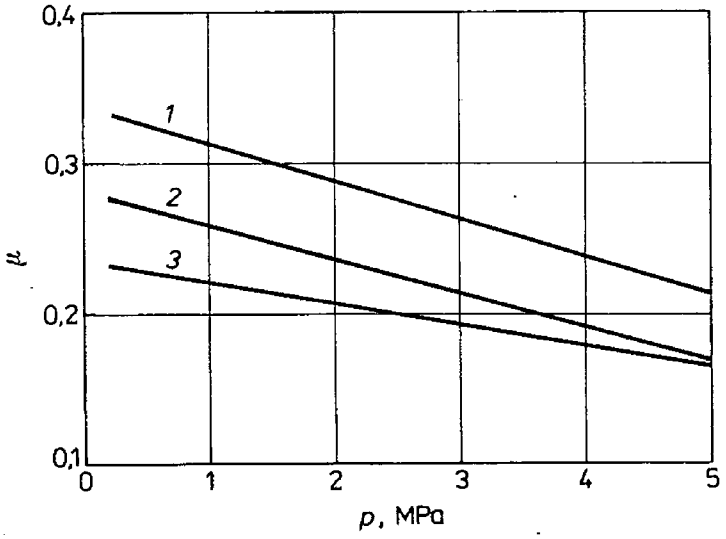
i właściwości usieciowanego PE (rys. 4.65). Podstawową wielkością charakteryzującą proces sieciowania jest *gęstość sieciowania* wyrażana przez liczbę segmentów łańcucha w sieci na jednostkę objętości albo przez średnią liczbowo masę cząsteczkową segmentów łańcucha między wiązaniami poprzecznymi. Zwykle czynnikami sieciującymi są związki o wiązaniach nienasyconych, przy czym najbardziej aktywne spośród nich są estry alkilowe bi- i trikarboksylowych kwasów organicznych. Jest także możliwe łączenie procesu sieciowania z procesem porowania, wytłaczania lub wtryskiwania porującego [4.36]. Uzyskuje się wytwory porowate o specyficznych właściwościach, np. o prawie idealnych właściwościach sprężystych.

PVC sieciuje się za pomocą układów sieciujących [4.24]. Prosty układ sieciujący składa się z niezbędnego inicjatora sieciowania i odpowiedniego katalizatora. Duże znaczenie ma układ disiarczek tetrametylotiuramu – tlenek cynku. Oba składniki tego układu spełniają co najmniej dwie funkcje: pierwszy z nich, oprócz podstawowej funkcji inicjatora sieciowania, oddziałuje jako środek antydegradacyjny w postaci tworzącego się dimetylodikarbaminianu cynku, tlenek cynku zaś nie tylko jest aktywatorem, ale jednocześnie oddziałuje jako „czynnik degradujący" bądź w postaci $ZnCl_2$ katalizuje degradację polimeru. Usieciowany PVC odznacza się większą wytrzymałością mechaniczną i dużą pamięcią kształtu w podwyższonej temperaturze.

Inne odmiany ulepszania chemicznego

Duże znaczenie ma ulepszanie chemiczne przedmiotów z PA poprzez działanie na nie 5-procentowymi wodnymi roztworami hydrochinonu (*p*-dihydroksybenzenu) $C_6H_6O_2$ lub jodku potasu KI w czasie 1÷4 h w temperaturze podwyższonej. Roztwór hydrochinonu dyfunduje na głębokość do około 120 μm, uporządkowuje strukturę nadmolekularną i działa plastyfikująco, natomiast jodek potasu dyfunduje na głębokość do około 100 μm, działa antyutleniająco i plastyfikująco. Procesy

ulepszania z użyciem obu związków chemicznych powodują polepszenie właściwości tribologicznych wyprasek wtryskowych z PA (rys. 4.66). Hydrochinon polepsza



Rys. 4.66. Zależność współczynnika μ tarcia technicznie suchego od nacisku jednostkowego p w skojarzeniu ślizgowym postępowo-zwrotnym wyprasek wtryskowych z PA 6 ze stalą 45: *1* — bez ulepszania chemicznego, *2* — po ulepszaniu z użyciem jodku potasu, *3* — po ulepszaniu z użyciem hydrochinonu [4.51]

właściwości zmęczeniowe, natomiast jodek potasu nieznacznie je pogarsza [4.51].

W makrocząsteczce PA atomy wodoru przy azocie mogą być podstawione grupą $COCF_3$. Otrzymany PA staje się wówczas rozpuszczalny w wielu rozpuszczalnikach organicznych, gdy wejściowe tworzywo jest nierozpuszczalne [4.83]. Poza tym grupa $COCF_3$ jest bardzo reaktywna i może łatwo wchodzić w reakcję z alkoholami, aminami pierwszo- i drugorzędowymi oraz aminokwasami.

Duże znaczenie ma również ulepszanie chemiczne wyprasek melaminowych, polegające na poddaniu ich działaniu roztworów środków hydrofobizujących, aby zwiększyć hydrofobowość, lub roztworami kwasów, które wiążąc się z melaminą mogłyby pozbawiać warstwę wierzchnią wyprasek właściwości wiązania kwasów tłuszczowych. Bardzo efektywne okazało się ulepszanie poprzez oddziaływanie na wypraski wrzącym 5-procentowym roztworem melaminy w 0,1-procentowym kwasie fosforowym H_3PO_4 przez okres 15 min. Ulepszanie to zmniejsza istotnie ekstrakcję wolnego formaldehydu z wyprasek (tabl. 4.10) i zwiększa odporność

Tablica 4.10

Zależność ekstrakcji wolnego formaldehydu z wyprasek melaminowych od temperatury i czasu oddziaływania 5-procentowym roztworem melaminy w 0,1-procentowym kwasie fosforowym [4.111]

Temperatura, °C	Czas, h	Ekstrakcja formaldehydu, mg/cm^2
20	8	0,103
40	6	0,098
60	2	0,089
80	1	0,079
100	0,25	0,081

wyprasek na plamienie powierzchniowe. Obie wymienione właściwości są ważne w odniesieniu do wyprasek używanych w celach spożywczych, np. naczyń (talerzy) melaminowych [4.111].

Trzeba jeszcze wspomnieć o ulepszaniu chemicznym w celu nadawania przedmiotom właściwości antystatycznych [4.1]. Można na przykład przedmioty zraszać cienką warstwą środka antystatycznego o grubości $0{,}01 \div 0{,}02$ μm, tak jak to proponuje firma Schwing Verfahrenstechnik (Niemcy).

Literatura

4.1. Anlage für das antistatische Austrüsten von Formteilen. *Kunststoffe* 6/1984.
4.2. Askew F.A.: „Printing Ink Manual". W. Heffer Ltd, Cambridge 1969.
4.3. Bagdach S.: Powłoki galwaniczne na tworzywach sztucznych. *Przegląd Mechaniczny* 17/1982.
4.4. Balas A. i inni: Otrzymywanie i właściwości lanych elastomerów uretanowych. *Polimery* 7/1983.
4.5. Barczuk R., Otachel K.: Urządzenia i przyrządy służące do łączenia elementów konstrukcji metodą klejenia. *Magazyn Technologa Przemysłu Lotniczego i Silnikowego* 9/1968.
4.6. BBS-Verfahren für PE-Behälter. *Kunststoffe – Plastics* 3/1987.
4.7. Braun H.J., Eyerer P.: PUR – RIM und PRIM-Technologie; Fortschritte und Wirtschaftlichkeit. *Kunststoffe* 10/1988.
4.8. Briscoe B.J., Khan M.B., Richardson S.M.: RI – RIM: a new concept in reactive processing. *Plastics Engineering* 11/1988.
4.9. Brojer Z., Hertz Z., Penczek P.: „Żywice epoksydowe". WNT, Warszawa 1982.
4.10. Castello A.: Choosing a flexoprinting machine. *Macplas International* 7/1988.
4.11. Chojnowski J., Stańczyk W.: Procesy chlorowania polietylenu. *Polimery* 12/1972.
4.12. Ciborowski J.: „Fluidyzacja". PWT, Warszawa 1957.
4.13. Ciesielska D.: Spienianie poliamidu w procesie polimeryzacji kaprolaktamu. *Przegląd Mechaniczny* 17/1982.
4.14. Ciesielska D., Kelar K.: Spienianie poliamidu 6 w procesie anionowej polimeryzacji kaprolaktamu. *Polimery* 8/1984.
4.15. Ciesielski L.: Pełzanie połączeń klejonych metali. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1976.
4.16. Coombes G.: Surface finishing — more than skin-deep. *Engineering* 11/1984.
4.17. Czaplicki J. i inni: „Klejenie tworzyw konstrukcyjnych". WKiŁ, Warszawa 1987.
4.18. De Bruyne N.A., Houwink R.: „Adhesion and Adhesives". New York — Amsterdam — London — Bruxell 1951.
4.19. De Lollis N.J., Montoya O.: *Adhesives Age* 6/1963.
4.20. Delmonte J.: „The Technology of Adhesives". Reinhold Publishing Co., New York 1947.
4.21. Developments in metalisation of plastics. *Engineering Materials and Design* 4/1986.
4.22. Dobrosz K., Matysiak A.: „Tworzywa sztuczne w pojazdach samochodowych". WKŁ, Warszawa 1982.
4.23. Drążkiewicz T., Raczyńska J.: „Powłoki ze zmiękczonego PVC na przedmiotach metalowych". WNT, Warszawa 1973.
4.24. Ducháček V.: Reakcje sieciowania polichlorku winylu. *Polimery* 11/1988.
4.25. Ehrenfeld E., Pietkiewicz H., Machina T.: Chlorowany polichlorek winylu. *Polimery* 10/1987.
4.26. „Elektroniczne zespoły bierne" (praca zbiorowa). Wyd. Instytutu Tele- i Radiotechnicznego, Warszawa 1981.
4.27. „Folie z polichlorku winylu" (praca zbiorowa pod red. Z. Roszkowskiego). WNT, Warszawa 1969.
4.28. Gajewski A.: Badania elektryzacji polipropylenu podczas procesu fluidyzacji. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 6/1984.
4.29. Gehrke K. i inni: Beiträge zur anionischen Polymerisation. *Plaste und Kautschuk* 11/1985.

4.30. Gruin I., Kiełkiewicz J.: Klejenie okładzin ciernych klejem AE-520 K. *Polimery* 9/1972.
4.31. Gruszczyński C.: „Farby graficzne". WSiP, Warszawa 1984.
4.32. Hall C.M.: RIM flexes its muscles seeking out new markets. *Plastics Engineering* 6/1985.
4.33. Infrared shaded plate. *Plastics Industry News* 9/1987.
4.34. Jendraszek M., Zelwert S.: Badania własności powłokotwórczych wodnych dyspersji kopolimerów octanu winylu. *Polimery* 12/1980 i 1/1981.
4.35. Jerzmański D., Fita S.: Zastosowanie replik powierzchni do oceny zużycia elementów maszyn. *Mechanik* 7-8/1979.
4.36. Józefoski J., Tomanek H.: Badanie procesu spieniania polietylenu sieciowanego. *Polimery* 10–11/1983.
4.37. Kelar K.: Porównanie metodą różnicowej analizy termicznej aktywności układów kanalizujących anionową polimeryzację kaprolaktamu. *Polimery* 5/1987.
4.38. Kelar K.: Wpływ temperatury na przebieg anionowej polimeryzacji kaprolaktamu inicjowanej dikaprolaktamianem bis(2-metoksyetoksy) glinowo-sodowym. *Polimery* 10/1988.
4.39. Kelar K., Bratborska E.: Badania wstępne w zakresie nowych związków inicjujących proces polimeryzacji anionowej kaprolaktamu. „Prace z inżynierii materiałowej". Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1979.
4.40. Kembłowski Z.: „Reometria płynów nienewtonowskich". WNT, Warszawa 1973.
4.41. „Kleje i klejenie" (praca zbiorowa pod red. C.V. Cagle'a). WNT, Warszawa 1977.
4.42. Kołak J., Ostrowski J.: „Maszyny drukujące". WSiP, Warszawa 1979.
4.43. Kowalski Z.: „Powłoki z tworzyw sztucznych". WNT, Warszawa 1973.
4.44. Kowalski Z., Bagdach S.: „Metalizacja tworzyw sztucznych i innych nieprzewodników". WNT, Warszawa 1965.
4.45. Kowalski Z., Raczyńska J.: Zastosowanie antykorozyjnych powłok polimerowych z dyspersji teflonowych. *Ochrona przed Korozją* 8/1969.
4.46. Kozik K., Suda H.: Wpływ środków pomocniczych na własności reologiczne i drukowe farb. *Polimery* 10–11/1983.
4.47. Kuczmaszewski J.: Badania niektórych właściwości mechanicznych i struktury połączeń adhezyjnych stal–tworzywo epoksydowe. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1981.
4.48. Kuczmaszewski J.: Prognozowanie wytrzymałości statycznej wybranych połączeń adhezyjnych. *Polimery* 7–8/1988.
4.49. Kuczmaszewski J.: „Technologia śmigłowców — Teoria i technika klejenia". Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1990.
4.50. Kuroiwa M. i inni: Electrical Conductivity and Electron Spin Resonanse in SO_3-Doped Poly(*p*-phenylene) sulfide. *Kobunshi Ronbunshu* 2/1984.
4.51. Litak A., Mazurkiewicz S.: Właściwości użytkowe tworzyw sztucznych stosowanych na elementy maszyn roboczych ciężkich. *Przegląd Mechaniczny* 21/1988.
4.52. Lorkiewicz J.: Klejenie okładzin ciernych. *Motoryzacja* 3/1967.
4.53. Low Combustibility, Easy Processing Mark New CPVC, PVC Compounds. *Plastics Technology* 8/1982.
4.54. Łączyński B.: „Metody przetwórstwa tworzyw sztucznych", WNT, Warszawa 1973.
4.55. Łuniewska D., Flaszyński J.: Stosowanie past ochronnych w procesach obróbki cieplnej. *Przegląd Mechaniczny* 9/1986.
4.56. Мацлулис А.Н., Торнау С.С.: „Дуффузённая стабилизацуя полимеров". Изд. Минтис, Вилнюс 1974.
4.57. Macosko C.W.: „Fundamentals of Reaction Injection Molding". Carl Hanser Verlag, Munich 1988.
4.58. Makarewicz E.: Elektroforetyczne nanoszenie powłok z organodyspersji PCW. *Ochrona przed Korozją* 4/1983.
4.59. Makarewicz E.: Nakładanie modyfikowanych plastizoli PCW metodą zanurzeniową. *Polimery* 2/1984.
4.60. Makarewicz E.: Wpływ dyspergatora i związku powierzchniowo czynnego na proces elektroforetycznego nakładania powłok z organodyspersji PCW. *Ochrona przed Korozją* 11/1984.

4.61. Mayer F.: Aufbringen von Fluoropolymerbeschichtungen: Methoden und Mittel. *Maschinenmarkt* 93/1978.
4.62. Michalak A.: Pianki poliuretanowe jako materiał izolacyjny ciepło i zimnochronny. „Główne kierunki zastosowań pianek poliuretanowych". NOT Oddział Wojewódzki w Bydgoszczy, 1975.
4.63. Milewski W.: „Elektrometalizacja". WNT, Warszawa 1968.
4.64. Mladenov I.T.: Modyfikacja elastomerów przez nitrowanie. *Polimery* 11/1988.
4.65. Multicoat Flexo Press for Packaging. *Plastics Technology* 8/1988.
4.66. Niklowanie chemiczne tworzyw sztucznych. *Mechanik* 7–8/1990.
4.67. „Ochrona przed Korozją — Poradnik" (praca zbiorowa). WKiŁ, Warszawa 1986.
4.68. Olczyk W.: „Poliuretany". WNT, Warszawa 1968.
4.69. Orłowska I.: Polietylen usieciowany. *Chemik* 9/1989.
4.70. Patent polski nr 107660.
4.71. Paszek Z.: Grubość powłoki z Tarnamidu T-27 jako funkcja czasu fluidyzacji. *Polimery* 10/1970.
4.72. Piątek A.: Napylanie elektrostatyczne proszków tworzyw sztucznych. *Polimery* 11/1971, 11 i 12/1972.
4.73. „Podstawowe procesy inżynierii chemicznej" (praca zbiorowa pod red. Z. Ziołkowskiego). PWN, Warszawa 1982.
4.74. Porejko S., Fejgin J., Zakrzewski L.: „Chemia związków wielkocząsteczkowych". WNT, Warszawa 1974.
4.75. „Powłoki malarsko-lakiernicze — Poradnik" (praca zbiorowa). WNT, Warszawa 1983.
4.76. Ptakowska-Wyżanowicz H.: „Klejenie metali". PWT, Warszawa 1961.
4.77. Puszyński A.: Chlorowanie folii polietylenowej. *Przemysł Chemiczny* 3/1990.
4.78. Raczyńska J., Kobus J.: Zastosowanie krajowego tarflenu do otrzymywania powłok. *Przegląd Mechaniczny* 9/1986.
4.79. Rogers J.K.: SRIM and RTM Sprint. *Plastics Technology* 3/1989.
4.80. Rozdział P.: „Technologia hermetyzacji sprzętu eektronicznego". WNT, Warszawa 1976.
4.81. Rozdział P.: „Tworzywa sztuczne w elektronice". WNT, Warszawa 1970.
4.82. Rühmann H.: Anlagenkonzepte und verfahrenstechnische Möglichkeiten des RIM-Verfahrens, *Kunststoffe* 1/1984.
4.83. Schulz R.: Alcuni nuovi monomeri e polimeri. *La Chimica e L'Industria* 12/1982.
4.84. Schütze E.C.: Bedrucken von Kunststoffen. *Kunststoffe* 8/1989.
4.85. Siemaszko A., Porejko S.: „Kleje naturalne i syntetyczne". PWT, Warszawa 1961.
4.86. Sikora R.: Ein neues Prüfverfahren für Klebverbindungen. *Adhäsion* 8/1971.
4.87. Sikora R.: Oprzyrządowanie technologiczne. *Przegląd Mechaniczny* 1/1983.
4.88. Sikora R.: Tworzywa epoksydowe jako materiały tribologiczne. W pracy zbiorowej „Wybrane problemy tribologii". PWN, Warszawa 1990.
4.89. Sikora R.: „Tworzywa epoksydowe w naprawie maszyn". WNT, Warszawa 1971.
4.90. Sikora R., Kuczmaszewski J.: Badania wytrzymałości długotrwałej statycznej niektórych konstrukcyjnych połączeń adhezyjnych. *Polimery* 9/1986.
4.91. Sikorski R.T.: „Podstawy chemii i technologii polimerów". PWN, Warszawa 1985.
4.92. Scrivo J.V.: It pays to mold large parts from RIM structural form. *Plastics Engineering* 3/1984.
4.93. Spychaj T., Pytlowska E.: Hydrofilizacja żywic epoksydowych w celu otrzymania farb wodorozcieńczalnych. *Polimery* 10/1990.
4.94. Стасюк И.С., Пегчобский В.Л., Федоткин И.М.: Нанесение полимерных покпытий на рулонные подчожки растробым волом. Хемеское и Нефтяное Машиностроение 2/1983.
4.95. Sterzyński T.: Niejednorodność struktury i własności oraz naprężenia własne w odlewach poliamidowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 1980.
4.96. Sterzyński T., Czarnecki J.: Naprężenia własne w odlewach poliamidowych. *Przegląd Mechaniczny* 5/1986.
4.97. Subicki K., Łukowski B.: Pudła z tektur falistych wzmocnionych nićmi syntetycznymi powlekanymi tworzywami termotopliwymi. *Opakowanie* 1–2/1982.
4.98. Surowiak W.: Lakierowanie tworzyw sztucznych. *Mechanik* 3/1970.
4.99. Surowiak W., Chudzyński S.: „Tworzywa sztuczne w budowie maszyn". WNT, Warszwa 1971.

4.100. Szlezyngier W.: „Chemia i technologia tworzyw sztucznych". Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1988.
4.101. Technologia klejenia w warunkach produkcji seryjnej. *Przegląd Mechaniczny* 9/1983.
4.102. Тенденцыи разбития флекцографской шецати. Экцпресс-Информацыя Оборыдование для Полиграфической Промышлености. Москва 1982.
4.103. „Uszlachetnianie powierzchni tworzyw sztucznych" (praca zbiorowa pod red. K. Stoeckherta). WNT, Warszawa 1979.
4.104. Vigotsky V.: Structural Plastics. *Plastics Engineering* 5/1989.
4.105. Walczyk W.: Postępy w dziedzinie tworzyw poliuretanowych. *Polimery* 5/1982.
4.106. Ważyńska B., Makaruk L.: Badania wpływu parametrów fluidyzacyjnego nakładania powłok poliamidowych na ich strukturę. *Polimery* 3 i 4/1979.
4.107. Wąsowicz H.: „Naprawa odlewów". WNT, Warszawa 1973.
4.108. Whelan A., Craft J.L.: „Developments in Plastics Technology". Elsevier Applied Science Publishers LTD, London — New York 1985.
4.109. Wirpsza Z.: „Poliuretany — chemia, technologia, zastosowanie". WNT, Warszawa 1991.
4.110. Wirpsza Z.: Postęp w dziedzinie poliuretanów. *Polimery* 11–12/1987.
4.111. Wirpsza Z., Aleksandrowicz M., Piechna J.: Obróbka powierzchniowa wyprasek melaminowych. *Polimery* 2/1977.
4.112. Wojciechowski S., Uzański M., Kinalski Z.: Urządzenie do natryskowego nanoszenia kleju i sklejania elementów wierzchnich obuwia. *Przegląd Skórzany* 8/1987.
4.113. Wood A.S.: RIM emerges as a major process. *Modern Plastics International* 8/1979.
4.114. Zaczek Z.: Studium wytrzymałości statycznej i odporności na działanie środowiska klejowych połączeń metali i laminatów szklanych. Zbiór prac nr 39A WSMW w Gdyni 1973.
4.115. Zimniak J.: Badania wpływu niektórych czynników technologicznych na odporność na oddzieranie obwodowe połączeń klejowych. Rozprawa doktorska, ATR w Bydgoszczy 1975.
4.116. Żebrowska K., Kozik K., Herman L.: Niektóre zagadnienia drukowności farby gazetowej BW-5 z formy fotopolimerowej i tradycyjnej. *Polimery* 4/1988.
4.117. Żenkiewicz M.: Teorie zjawisk występujących w warstwie granicznej folii poliolefin i farby drukarskiej. *Polimery* 7/1987.

Rozdział 5

TECHNOLOGIA I ORGANIZACJA PRZETWÓRSTWA

5.1. Wprowadzenie

Przedstawione dotychczas wiadomości o podstawach procesu uplastyczniania i metodach przetwórstwa są niewystarczające do osiągania celów przetwórstwa oraz realizacji kierunków jego rozwoju. Wiadomości te należy uzupełnić zagadnieniami technologii i organizacji przetwórstwa.

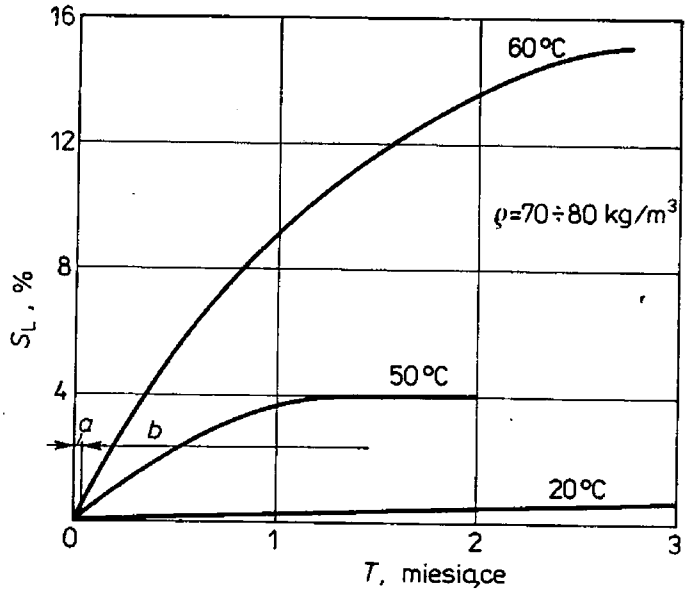
Przyjmuje się, że technologia i organizacja przetwórstwa obejmuje przede wszystkim: problemy dokładności wytworów, doboru warunków przetwórstwa w odniesieniu do poszczególnych metod z uwzględnieniem ich optymalizacji, zagadnienia ogólne procesów technologicznych przetwórstwa oraz bardziej szczegółowe, odniesione do danych metod, projektowanie procesów technologicznych, organizację linii i stanowisk technologicznych. Zagadnienia narzędzi przetwórczych i utylizacji odpadów tworzyw, często zaliczane również do problematyki technologii i organizacji przetwórstwa [5.106], ze względu na rozległość i pewną specyfikę, będą przedstawione oddzielnie.

5.2. Dokładność wytworów

Rozważając dokładność wytworów z tworzyw bierze się przede wszystkim pod uwagę zagadnienia związków *skurczu przetwórczego* z warunkami przetwórstwa i wymiarami wytworu, tolerancji i odchyłek wymiaru oraz zapobiegania powstawaniu anomalii wytworów lub przetworów.

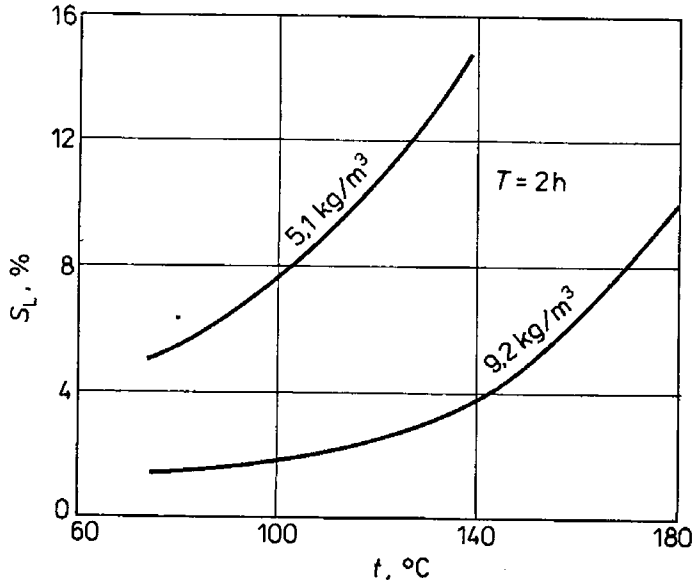
5.2.1. Skurcz — warunki przetwórstwa — wymiary

Podane w literaturze wiadomości o wartościach skurczu przetwórczego dotyczą przede wszystkim tworzyw litych. *Skurcz tworzyw porowatych* jest jeszcze mało zbadany, o czym świadczą nieliczne publikacje na ten temat [5.17, 5.130]. Jest on głównie wynikiem działania dodatkowego czynnika, nie wymienianego dotąd, a mianowicie tego, że w porach tworzywa pozostaje uwięziony pod pewnym ciśnieniem gaz, który wskutek dyfuzji wydziela się na zewnątrz, co powoduje zmniejszenie objętości lub wymiarów przedmiotu porowatego. Proces ten trwa stosunkowo długo, zwłaszcza w przedmiotach grubościennych w temperaturze normalnej lub nieco podwyższonej.



Rys. 5.1. Zależność skurczu liniowego S_L porowatego PVC półsztywnego od czasu T w różnej temperaturze: a — czas skurczu pierwotnego, b — czas skurczu wtórnego [5.72]

Rys. 5.2. Zależność skurczu liniowego S_L porowatego tworzywa mocznikowego o różnej gęstości pozornej od temperatury t pod naciskiem 1 N/cm² [5.72]



Skurcz całkowity jest tym większy, im wyższa jest temperatura, w której przedmiot przebywa (rys. 5.1) i mniejsza gęstość pozorna tworzywa (rys. 5.2); może on przyjmować wartości do 30÷40% i większe. Skurcz pierwotny tworzyw porowatych wynosi od ułamka procenta do kilkunastu procent skurczu całkowitego, a więc skurcz wtórny staje się dominujący. Dla porównania należy zaznaczyć, że w przypadku tworzyw litych skurcze pierwotny i wtórny są często porównywalne i zazwyczaj nie przekraczają 3% każdy.

Wracając do problematyki *skurczu przetwórczego tworzyw litych* trzeba przede wszystkim zauważyć, że dla danego tworzywa przetwarzanego określoną metodą zależy on w istotny sposób od parametrów przetwórstwa, konstrukcji narzędzia przetwórczego i konstrukcji przedmiotu. Zostanie to bliżej scharakteryzowane na przykładzie wtryskiwania, w przypadku którego dysponuje się dobrymi opracowaniami H. Zawistowskiego i D. Frenklera [5.139] oraz A. Smorawińskiego [5.116].

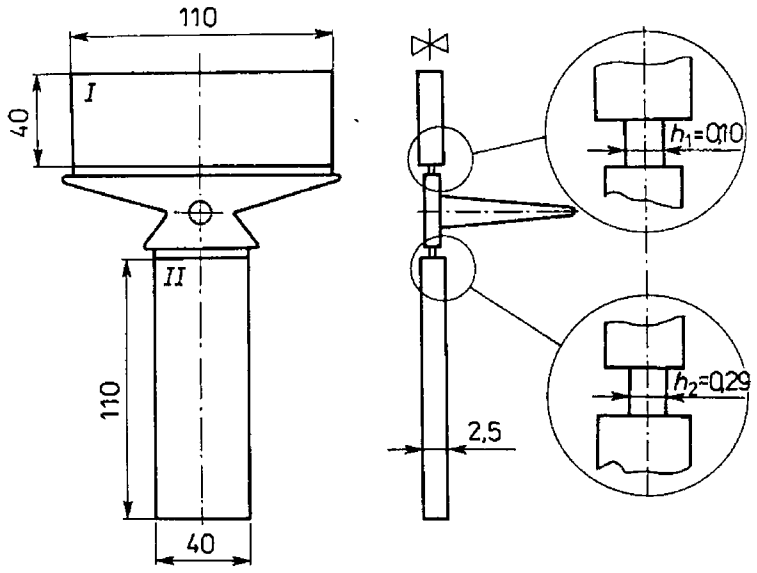
Struktura danego tworzywa i jego skład wpływają istotnie na *skurcz wtryskowy*. Obecność napełniaczy zmniejsza i stablizuje skurcz (tabl. 5.1). W przypadku POT różniącego się wartością wskaźnika szybkości płynięcia (WSP = 2÷14 g/10 min)

skurcz pierwotny wyprasek w kształcie prostopadłościanu, zarówno wzdłużny, jak i poprzeczny, maleje ze wzrostem WSP, przy czym skurcz wzdłużny jest około 1,6÷1,8 razy większy niż poprzeczny (rys. 5.3).

Tablica 5.1

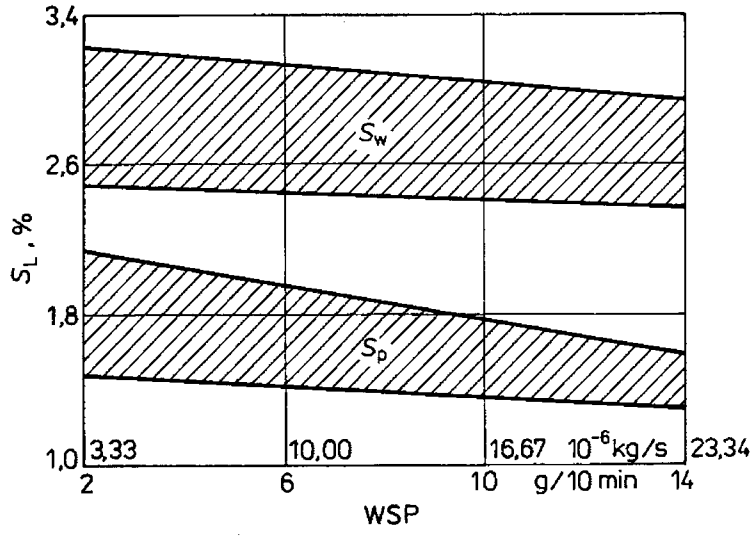
Skurcz i anizotropia skurczowa wtryskowych tworzyw poliestrowych [5.123]

Rodzaj tworzywa poliestrowego	Wypraska I				Wypraska II			
	Skurcz, %		Anizotropia skurczowa		Skurcz, %		Anizotropia skurczowa	
	S_w	S_p	S_a'	S_a''	S_w	S_p	S_a'	S_a''
E-13(0)	1,46	1,55	−6,16	0,94	1,58	1,50	5,06	1,05
E-13(20, 6)	1,18	0,44	62,71	2,68	0,46	0,91	−97,83	0,51
E-13(25, 6)	1,21	0,38	68,59	3,18	0,38	0,79	−107,89	0,48
E-13(25, 12)	1,25	0,37	70,40	3,37	0,35	0,83	−137,14	0,42
E-31(20,6)	0,61	0,15	75,41	4,07	0,14	0,30	−114,28	0,47
E-31(26, 6)	0,67	0,16	76,12	4,18	0,11	0,49	−345,45	0,22
E-31(25, 12)	0,69	0,16	76,81	4,31	0,10	0,50	−400,00	0,20

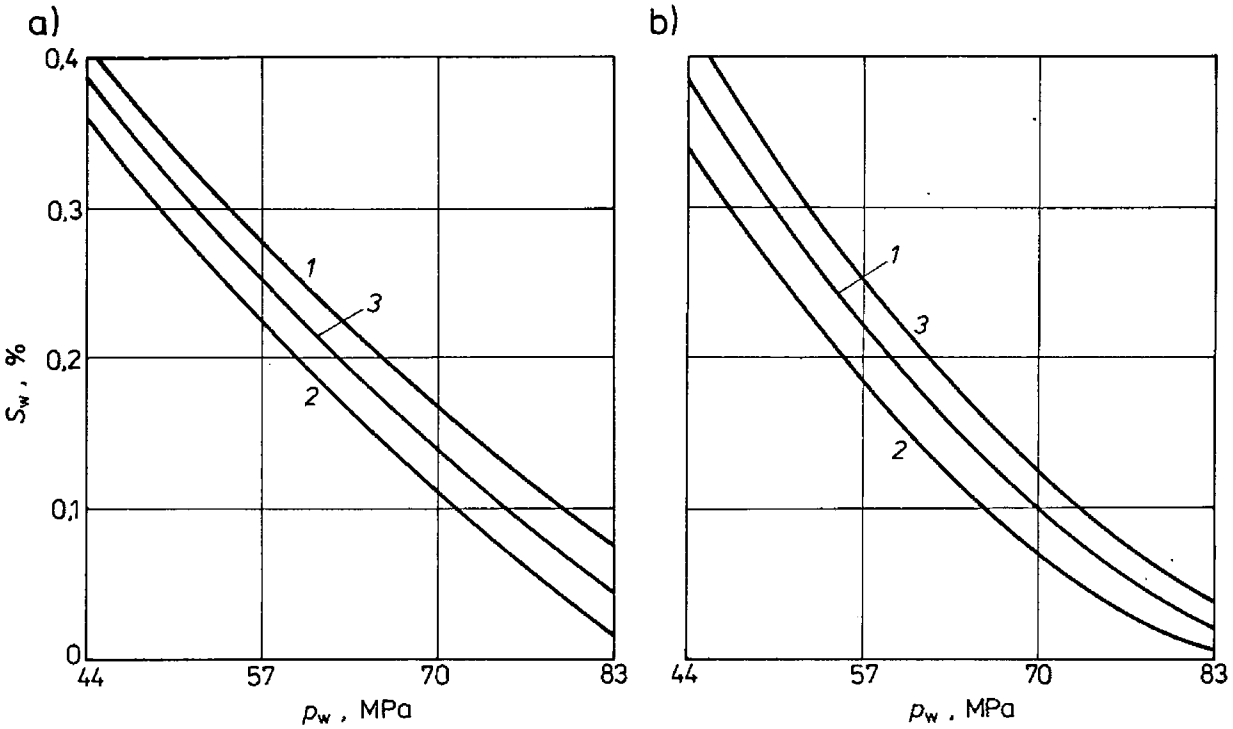


Uwaga: S_w oznacza skurcz wzdłużny, S_p — skurcz poprzeczny, S_a' oznacza $[(S_w - S_p)/S_w]100\%$, S_a'' zaś oznacza S_w/S_p, E-13 — Estrodur 13, E-31 — Estrodur 31, liczby w nawiasach oznaczają: pierwsza — zawartość włókna szklanego w %, druga — długość włókna szklanego w mm.

Na ogół zwiększenie ciśnienia wtryskiwania, ciśnienia docisku i temperatury wtryskiwania tworzywa termoplastycznego powoduje zmniejszenie skurczu wtryskowego, natomiast wzrost temperatury formy oraz szybkości wtryskiwania powoduje jego zwiększenie. Niektóre zależności w tym zakresie są przedstawione przykładowo na rys. 5.4. Wypraski z form wielogniazdowych odznaczają się znacznym rozrzutem skurczu; powiększenie liczby gniazd o jedno powoduje wzrost rozrzutu o 1÷5% wartości skurczu [5.17, 5.39, 5.139]. Skurcz powiększa się wzdłuż kierunku przepływu w kanałach wtryskowych formy w miarę zwiększania się odległości gniazda formującego do wtryskowego kanału centralnego (tabl. 3.6), co wynika ze spadku ciśnienia wzdłuż drogi przepływu tworzywa. Ponieważ przewężka zmniejsza ciśnienie



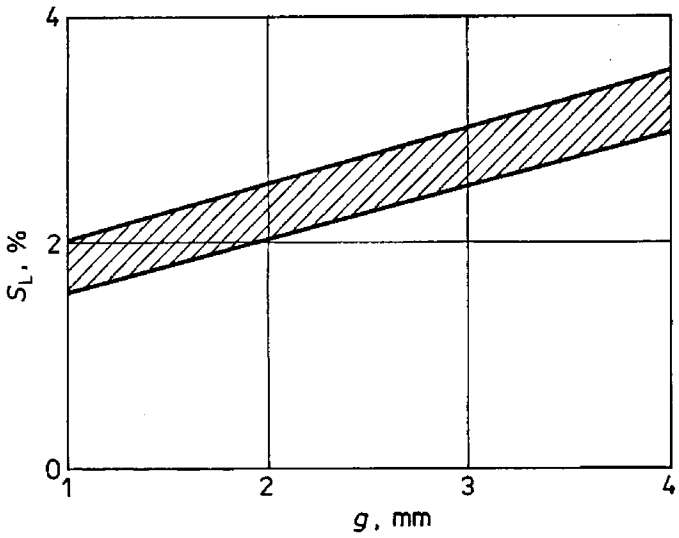
Rys. 5.3. Zależność skurczu wtryskowego pierwotnego liniowego S_L (wzdłużnego S_w i poprzecznego S_p) od wskaźnika szybkości płynięcia WSP w przypadku POT, oznaczanego dla wyprasek w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 110 × 12,5 × 4 mm, otrzymywanych za pomocą wtryskarki Formoplast 235 przy ciśnieniu wtryskiwania 62,7÷86,2 MPa, temperaturze wtryskiwania 170÷190°C i temperaturze formy 30÷90°C; obszar zakreskowany oznacza rozrzut skurczu [5.55]

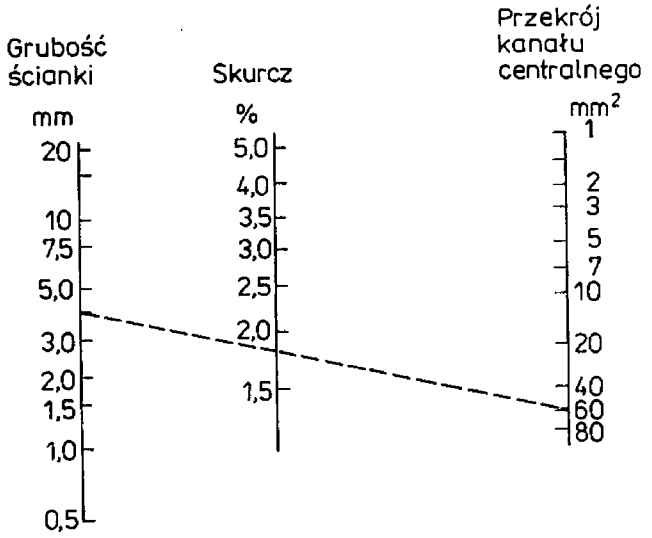


Rys. 5.4. Zależność skurczu wtryskowego pierwotnego wzdłużnego S_w (po 24 h) od ciśnienia wtryskiwania p_w w przypadku PS (Edistir) wtryskiwanego do formy z przewężką szczelinową boczną za pomocą wtryskarki Formoplast 165: a) temperatura tworzywa w dyszy 190°C, b) temperatura tworzywa w dyszy 230°C; *1* — temperatura formy 35°C, *2* — 50°C, *3* — 60°C [5.42]

docisku, zatem im przewężka ma mniejsze wymiary, tym większy skurcz. Powiększanie grubości ścianki wypraski wydłuża czas jej chłodzenia, co pociąga za sobą wzrost skurczu (rys. 5.5). Jeżeli wypraska nie ma ostrych krawędzi, np. przy przejściu z dna w ściankę boczną, co ułatwia przepływ tworzywa i zmniejsza straty ciśnienia, to skurcz jest mniejszy. Istotne są również związki pomiędzy grubością ścianki wypraski, przekrojem poprzecznym kanałów wtryskowych, zwłaszcza centralnego, a skurczem; na rys. 5.6 pokazano nomogram sporządzony dla POM, wiążący ze sobą te wielkości w temperaturze form 65÷90°C i przy ciśnieniu wtryskiwania 100÷140 MPa.

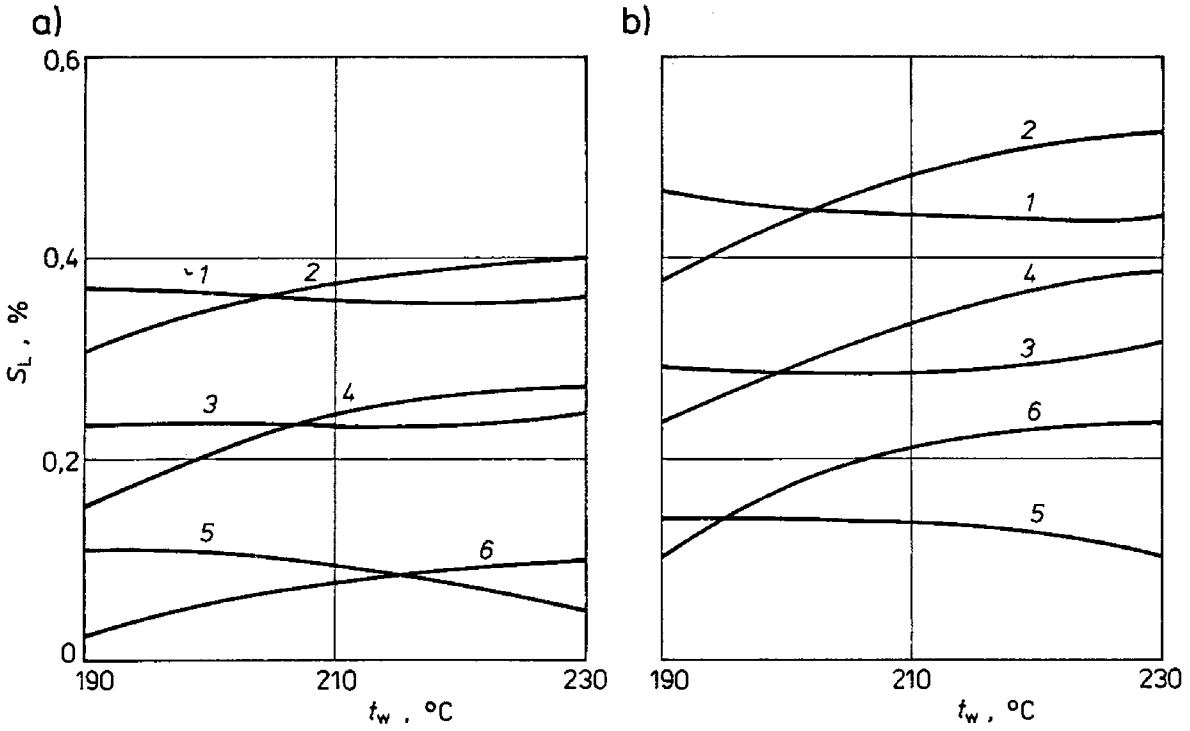
Rys. 5.5. Zależność skurczu wtryskowego pierwotnego liniowego S_L od grubości g ścianki wypraski z POM; obszar zakreskowany oznacza rozrzut skurczu [5.116]



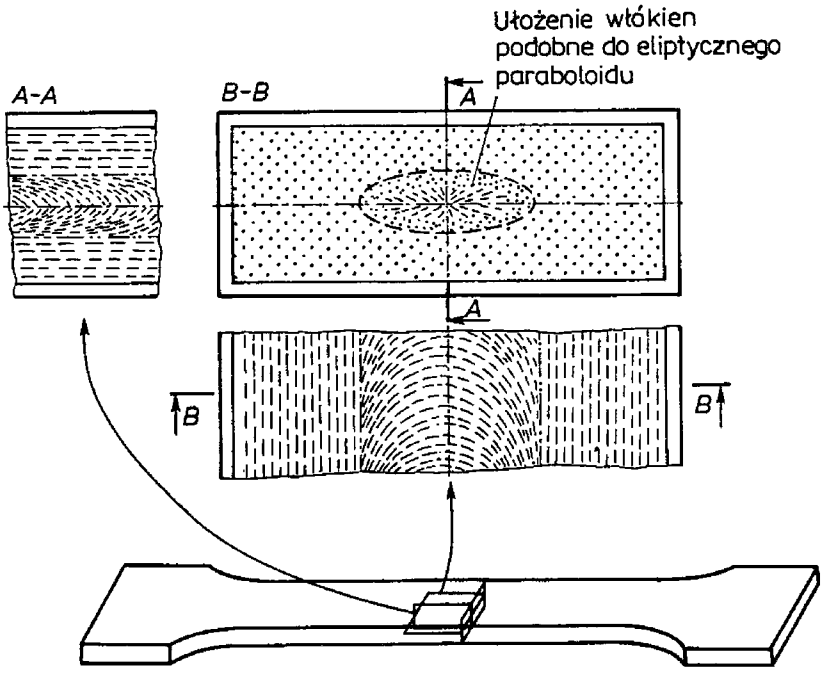


Rys. 5.6. Nomogram wiążący ze sobą grubość ścianki wypraski z POM, przekrój poprzeczny wtryskowego kanału centralnego formy i skurcz pierwotny liniowy [5.116]

Anizotropia skurczowa tworzyw nienapełnionych jest stosunkowo mała, zwłaszcza tworzyw bezpostaciowych (rys. 5.7). Anizotropia zależy głównie od zawartości i kształtu napełniaczy, sposobu doprowadzenia tworzywa do gniazda formującego oraz od kształtu przewężki. Napełniacze powodują, że skurcz w kierunku orientacji napełniacza, zwłaszcza w kształcie włókien krótkich i płatków, jest mniejszy o 20÷30% niż w kierunku do niego prostopadłym. Usytuowanie napełniacza krótkowłóknistego w wyprasce jest dość złożone; występują w niej strefy z włóknami zorientowanymi równolegle i prostopadle do kierunku przepływu oraz strefy włókien niezorientowanych. Na rysunku 5.8 jest przedstawione przykładowo ułożenie włókien krótkich w wyprasce płaskiej. Zatem w wypraskach z tworzywa napełnionego włóknami krótkimi skurcz — związany z orientacją włókien [5.6] — jest zmienny w określonym kierunku, niezależnie od anizotropii powodowanej innymi czynnikami. Efekt ten jest intensyfikowany przez wzrost zawartości włókien. Wpływ sposobu doprowadzenia tworzywa do gniazda na anizotropię skurczową pokazano, w odniesieniu do wypraski w kształcie płytki prostokątnej i pierścienia, na rys. 5.9 i 5.10. W przypadku tworzyw napełnionych nakłada się na to oddziaływanie napełniacza, co w odniesieniu do wyprasek w kształcie prostopadłościanu o wymiarach 110 × 40 × 2,5 mm z tworzywa poliestrowego napełnionego krótkimi włóknami szklanymi pokazano w tabl. 5.1.

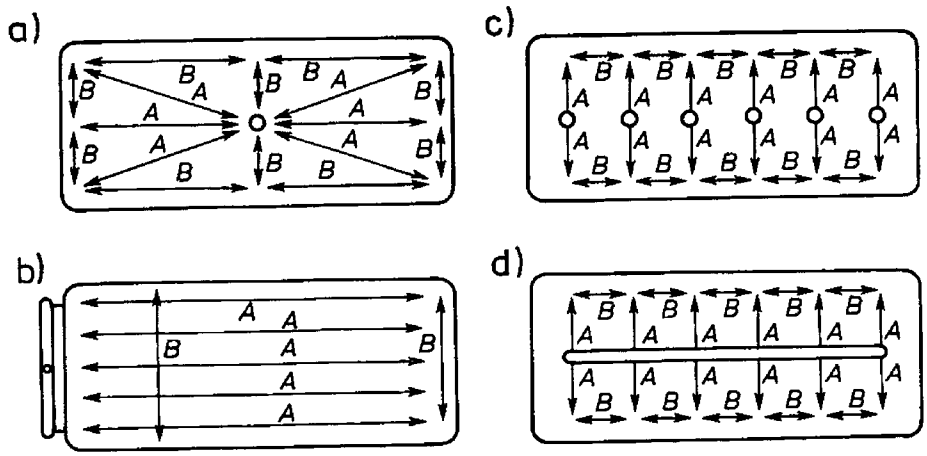


Rys. 5.7. Zależność skurczu wtryskowego S_L pierwotnego (a) po 24 h i wtórnego (b) po 1440 h od temperatury t_w tworzywa w dyszy w przypadku PS (jak w podpisie pod rysunkiem 5.4):*1, 3, 5* — S_w, *2, 4, 6* — S_p, *1, 2* — ciśnienie wtryskiwania 44 MPa, *3, 4* — 57 MPa, *5, 6* — 70 MPa [5.42]

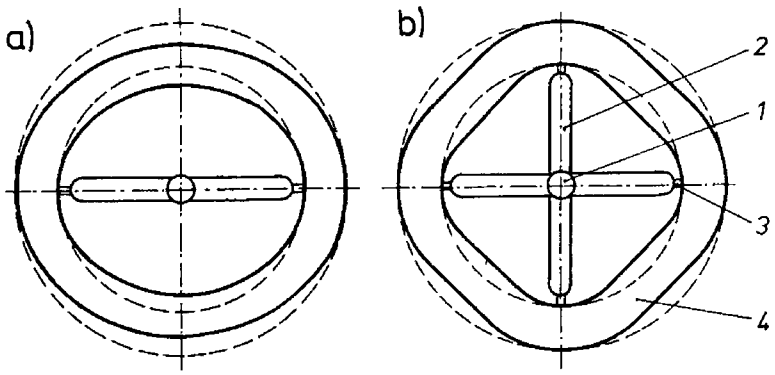


Rys. 5.8. Schemat ułożenia włókien krótkich w wyprasce płaskiej [5.48]

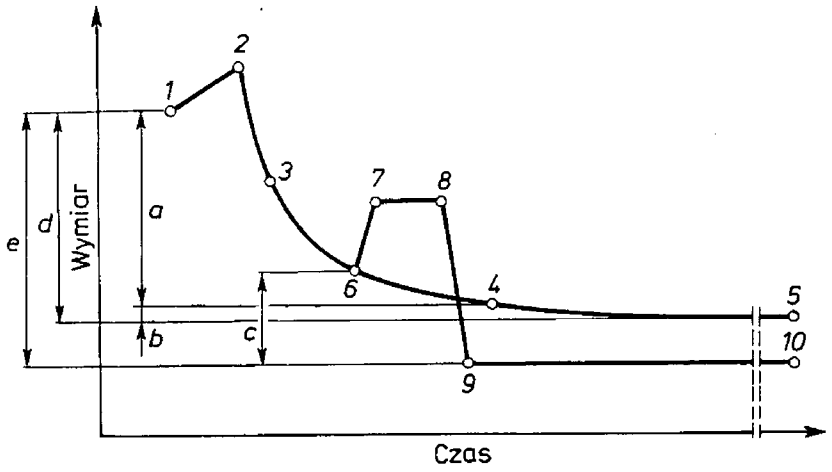
W przypadku wyprasek wtryskiwanych i prasowanych związek skurczu wtryskowego i prasowniczego z wymiarami wyprasek można przejrzyście analizować graficznie w układzie współrzędnych prostokątnych: wymiar liniowy — czas (rys. 5.11). Dla danego wymiaru liniowego, punkt (*1*) odpowiada wymiarowi gniazda formy wtryskowej lub prasowniczej w temperaturze normalnej, punkt (*2*) zaś wymiarowi gniazda formy ogrzanej i wymiarowi wypraski uformowanej po wypełnieniu gniazda. Z chwilą zakończenia docisku i odsuwania ślimaka lub tłoka — w przypadku



Rys. 5.9. Wpływ sposobu doprowadzenia tworzywa do gniazda na anizotropię skurczową wypraski: a) wlew centralny normalny lub punktowy, b) wlew boczny szczelinowy, c) wlew wielopunktowy rzędowy, d) wlew szczelinowy czołowy; *A* — skurcz w kierunku przepływu tworzywa, *B* — skurcz w kierunku do niego prostopadłym (poprzecznym) [5.120, 5.139]



Rys. 5.10. Odkształcenia wypraski pierścieniowej spowodowane anizotropią skurczową zależnie od sposobu doprowadzenia tworzywa do gniazda: a) doprowadzenie w dwu miejscach, b) doprowadzenie w czterech miejscach; *1, 2, 3* — wlewek, *1* — część odpowiadająca wtryskowemu kanałowi centralnemu, *2* — część odpowiadająca kanałom przepływowym, *3* — część odpowiadająca przewężkom, *4* — wypraska



Rys. 5.11. Związek skurczu z wymiarami wypraski (oznaczenia cyfrowe w tekście): *a* — skurcz pierwotny, *b* — skurcz wtórny wyprasek z tworzyw bezpostaciowych, *c* — skurcz wtórny wyprasek z tworzyw częściowo krystalicznych, poddanych ulepszaniu cieplnemu, *d* — skurcz przetwórczy wyprasek z tworzyw bezpostaciowych, *e* — skurcz przetwórczy wyprasek z tworzyw częściowo krystalicznych poddanych ulepszaniu cieplnemu; *a, b, c, d* oraz *e* są wartościami skurczu obliczeniowego

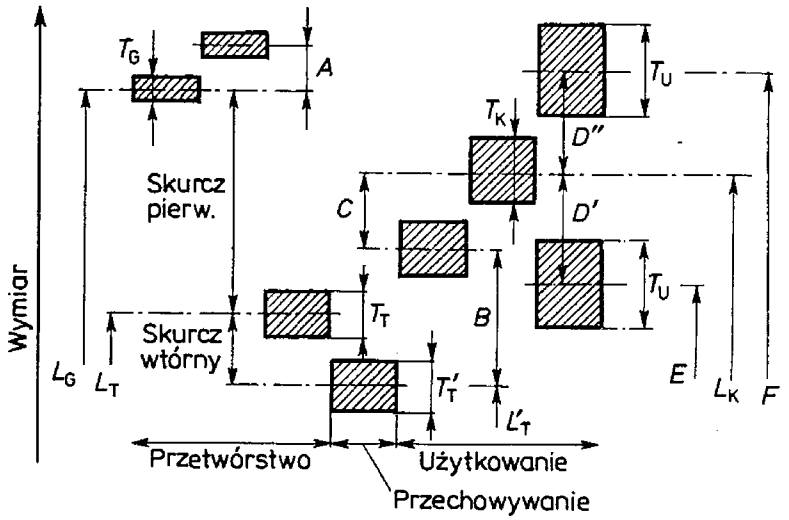
wtryskiwania, bądź z chwilą zmniejszania siły zamykającej formę — w przypadku prasowania, rozpoczyna się skurcz pierwotny. Po usunięciu wypraski z gniazda formy, rozpatrywany wymiar zmniejszył się wskutek zachodzącego skurczu pierwotnego do wartości w punkcie (*3*), przy czym następuje dalsze zmniejszanie wymiaru, gdyż występuje nadal skurcz pierwotny. Przyjmuje się umownie jego zakończenie, najczęściej pomiędzy 24 a 168 godzinami po usunięciu wypraski z gniazda, czemu odpowiada punkt (*4*). Od punktu (*4*), zaczyna się skurcz wtórny, który po długim czasie kończy się w punkcie (*5*).

Skurcz wtórny można przyspieszyć poprzez ulepszanie cieplne wyprasek, które może rozpocząć się już pod koniec trwania skurczu pierwotnego, tj. w punkcie (*6*). W przypadku tworzyw częściowo krystalicznych punkty (*7*) i (*8*) odpowiadają wymiarom wypraski w procesie ulepszania cieplnego. Po ulepszaniu cieplnym wypraska ma wymiar jak w punktach (*9*) i (*10*).

5.2.2. Tolerancje wymiaru

Ze względu na złożoność problematyki, zagadnienia tolerancji wymiaru zostały dotychczas opracowane w stopniu dostatecznym jedynie dla wybranych wytworów o dużym znaczeniu technicznym — wyprasek wtryskiwanych i prasowanych.

Podstawą rozważań jest dany *wymiar nominalny* L_G gniazda formującego formy wtryskowej lub prasowniczej, charakteryzujący się odchyłkami wymiaru, górną i dolną. Różnica górnego i dolnego wymiaru granicznego jest *tolerancją wymiaru gniazda* T_G (rys. 5.12). W temperaturze przetwórstwa, wskutek rozszerzalności cieplnej



Rys. 5.12. Rodzaje i rozkład tolerancji i odchyłek wymiaru wypraski; oznaczenia w tekście

materiału gniazda, jego wymiary powiększają się o wartość A, przy czym przyjmuje się, że tolerancja nie ulega istotnej zmianie. W procesie wtryskiwania lub prasowania i po jego zakończeniu, wskutek skurczu pierwotnego, wymiar L_G przybiera wartość *wymiaru technologicznego* L_T wypraski, a tolerancja wymiaru na ogół powiększa się o rozrzut skurczu pierwotnego, przyjmując wartość T_T

$$T_T > T_G \tag{5.1}$$

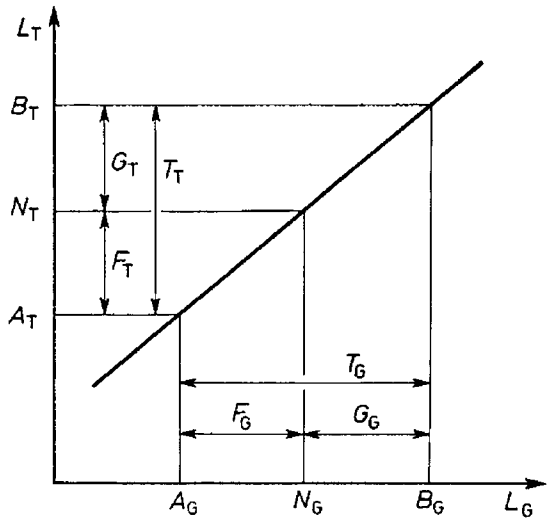
Tolerancję T_T nazywa się krótko *tolerancją technologiczną wypraski*. W przypadku

dużej wartości skurczu i bardzo małego jego rozrzutu $T_G > T_T$. Tolerancja technologiczna jest związana z odchyleniem standardowym rozkładu wymiaru zmierzonego wypraski. W przypadku rozkładu skupionego, pokazanego na rys. 3.58b

$$T_T > 6S \tag{5.2}$$

gdzie T_T oznacza na rysunku odległość między dwoma liniami pionowymi, symetrycznymi względem osi, S zaś — odchylenie standardowe.

Związki pomiędzy wielkościami charakteryzującymi tolerancję wymiaru gniazda i tolerancję wymiaru technologicznego wypraski przedstawiono graficznie na rys. 5.13.



Rys. 5.13. Zależności wielkości charakteryzujących tolerancję wymiaru technologicznego wypraski (indeks T) od wielkości charakteryzujących tolerancję wymiaru gniazda (indeks G): N — wymiar nominalny, A — dolny wymiar graniczny, B — górny wymiar graniczny, F — odchyłka dolna, G — odchyłka górna, T — tolerancja wymiaru

Z kolei wskutek skurczu wtórnego, rozpatrywany wymiar ulega dalszemu zmniejszaniu do L'_T, tolerancja zaś może zwiększyć się o rozrzut skurczu wtórnego, przyjmując wartość T'_T. Tolerancja ta jest tolerancją technologiczną po zakończonym skurczu wtórnym, np. w przypadku dodatkowego ulepszania cieplnego wypraski. Zatem

$$T'_T \geqslant T_T \tag{5.3}$$

Dla przejrzystości rozważań przyjmuje się, że wypraska pochłania wilgoć z otoczenia dopiero po zakończonym skurczu wtórnym, przez co powiększa się jej wymiar nominalny o wartość B (rys. 5.12), jak również powiększa się tolerancja o rozrzut powodowany wahaniem wilgotności. W przypadku wzrostu temperatury podczas użytkowania, wypraska dalej zwiększa swój wymiar nominalny o wartość C, przyjmując wartość L_K, która stanowi *wymiar konstrukcyjny*; zwiększa się również tolerancja o rozrzut wskutek wahania temperatury, przyjmując wartość

$$T_K > T_T \tag{5.4}$$

Tolerancję T_K nazywa się krótko *tolerancją konstrukcyjną* wypraski. W przypadku spadku temperatury podczas użytkowania, wypraska zmniejsza wymiar nominalny, a powiększa się tolerancja (tego przypadku nie pokazano na rysunku).

Jeżeli w procesie użytkowania występują naprężenia ściskające, to wymiar nominalny wypraski ulega zmniejszeniu o wartość D, przyjmując wartość E, będącą *wymiarem*

użytkowym wypraski; zwiększa się jednak tolerancja o rozrzut odkształceń wywołany wahaniem naprężeń ściskających, przyjmując wartość T_U

$$T_U > T_K \tag{5.5}$$

Tolerancja T_U jest *tolerancją użytkową (eksploatacyjną)* wypraski.

Gdy wystąpią naprężenia rozciągające, wówczas wymiar nominalny wypraski zwiększy się o wartość D', przyjmując wartość F, będącą także wymiarem użytkowym wypraski, oraz zwiększa się tolerancja o rozrzut odkształceń spowodowany wahaniem naprężeń rozciągających, przyjmując wartość większą od wartości tolerancji konstrukcyjnej. Tolerancja ta, jak poprzednio, nazywa się również tolerancją użytkową wypraski.

Dla wyprasek nie podlegających w czasie użytkowania naprężeniom, wymiary i tolerancje konstrukcyjne są oczywiście równe wymiarom i tolerancjom użytkowym.

W zależności od relacji między wymiarem technologicznym L_T i tolerancją technologiczną T_T, wypraski wtryskiwane można podzielić na następujące klasy:

— *wypraski normalne,* otrzymywane w rezultacie wtryskiwania normalnego, prowadzonego w warunkach wtryskiwania konwencjonalnego (rozdz. 3, p. 3.2.1)

$$T_T = 1\% \text{ wymiaru } L_T$$

— *wypraski techniczne,* otrzymywane w rezultacie wtryskiwania technicznego, prowadzonego w warunkach wtryskiwania dokładnościowego (rozdz. 3, p. 3.2.2)

$$T_T = 0{,}6\% \text{ wymiaru } L_T$$

— *wypraski precyzyjne,* otrzymywane w rezultacie wtryskiwania precyzyjnego, prowadzonego w warunkach wtryskiwania dokładnościowego

$$T_T = 0{,}3 \div 0{,}4\% \text{ wymiaru } L_T$$

Podczas wtryskiwania precyzyjnego parametry powinny być zachowane z następującą dokładnością [5.39]: temperatura wtryskiwania $\pm 5°C$, temperatura formy $\pm 2°C$, ciśnienie wtryskiwania ± 5 MPa, ciśnienie docisku ± 3 MPa, czas poszczególnych faz cyklu wtryskiwania $\pm 0{,}3$ s.

Ważna jest zależność pomiędzy danym wymiarem konstrukcyjnym, który ustala się podczas projektowania wypraski, a wymiarem technologicznym oraz zależność pomiędzy tolerancją konstrukcyjną, którą również ustala się przy projektowaniu wypraski, a tolerancją technologiczną. Na rysunku 5.14 przedstawiono istotę tej współzależności. Przyjmując oznaczenia według rys. 5.12 oraz oznaczając ΔL_T jako zmniejszenie wymiaru technologicznego w wyniku skurczu wtórnego, L'_T — wymiar technologiczny po zakończonym skurczu wtórnym, $\Delta L'_T$ — zwiększenie wymiaru spowodowane rozszerzalnością cieplną i higroskopijnością, L_K — wymiar kontrukcyjny oraz ΔT_K — wahania tolerancji T_K wskutek wahań temperatury i wilgotności, można napisać, że

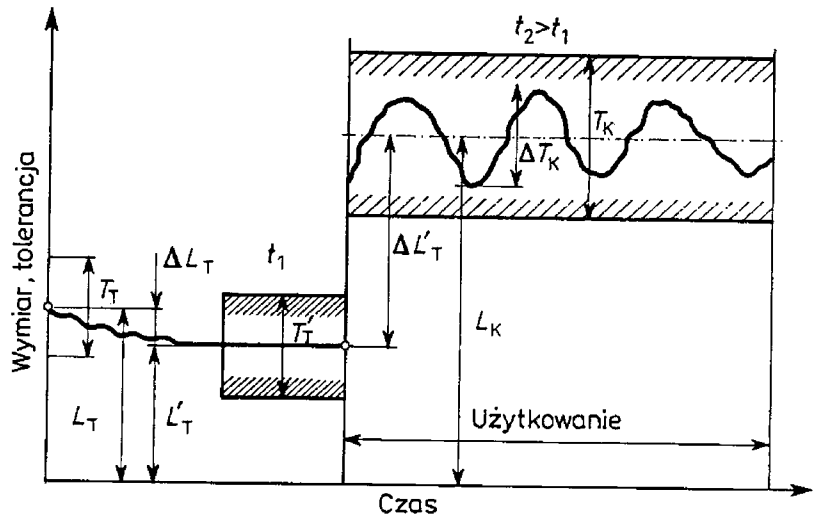
$$L_K = L'_T + \Delta L'_T \tag{5.6}$$

oraz

$$L'_T = L_T - \Delta L_T \tag{5.7}$$

a zakładając, że skurcz wtórny S_{wt} wyrażony w mm/mm odnosi się do wymiaru L_T, a nie do L_G, można napisać

$$\Delta L_T = L_T S_{wt} \tag{5.8}$$



Rys. 5.14. Wymiary, zmiany wymiarów i tolerancji wypraski w zależności od czasu, wilgotności i temperatury użytkowania

Wartość $\Delta L'_T$ we wzorze (5.6) ma dwie składowe:

— składową $\Delta L'_{T_t}$ będącą rezultatem rozszerzalności cieplnej w zakresie od temperatury skurczu wtórnego, np. otoczenia t_1, do temperatury użytkowania t_2

$$\Delta L'_{T_t} = \alpha_1 (t_2 - t_1)\, L'_T \tag{5.9}$$

gdzie α_1 oznacza współczynnik rozszerzalności liniowej tworzywa wypraski w podanym zakresie temperatury,

— składową $\Delta L'_{T_w}$ będącą rezultatem higroskopijności

$$\Delta L'_{T_w} = L'_T\, a_w \tag{5.10}$$

gdzie a_w oznacza poprawkę wymiaru ze względu na higroskopijność; przyjmuje się, że zależy ona bezpośrednio od bezwzględnej ilości X wody pochłoniętej przez tworzywo, określanej przez przyrost masy wypraski w rezultacie higroskopijności

$$a_w \approx \frac{X}{4} \tag{5.11}$$

Dotychczas nie dysponuje się jeszcze szczegółowymi wartościami X w odniesieniu do poszczególnych tworzyw w różnych warunkach; wartości orientacyjne można znaleźć w literaturze [5.139]. Spośród tworzyw termoplastycznych znaczną higroskopijnością odznaczają się poliamidy, a stosuje się je często na wypraski techniczne oraz precyzyjne jako elementy maszyn i z tego powodu jest konieczna dobra znajomość ich higroskopijności w rozmaitych warunkach. W tablicy 5.2 przedstawiono niektóre dane w tym zakresie.

Podstawiając do wzoru (5.6) zależności (5.9) i (5.10), otrzymuje się

$$L_K = L'_T + L'_T\, \alpha_1 (t_2 - t_1) + L'_T\, a_w \tag{5.12}$$

Ponieważ ze wzorów (5.7) oraz (5.8) wynika, że

$$L'_T = L_T\, (1 - S_{wt}) \tag{5.13}$$

więc zależność (5.12) przybiera postać

$$L_K = L_T (1 - S_{wt})\, [1 + \alpha_1 (t_2 - t_1) + a_w] \tag{5.14}$$

lub przyjmując, że iloczyny $(S_{wt}\, \alpha_1)$ oraz $(S_{wt}\, a_w)$ mają wartości pomijalnie małe

Tablica 5.2

Właściwości higroskopijne wyprasek z PA [5.41, 5.139]

Rodzaj	Wielkości charakterystyczne		Otoczenie					
			Biuro, dom		Magazyn, hala maszyn		Wolne powietrze	
			Grubość ścianek wypraski, mm					
			4	8	4	8	4	8
PA 6	X, %	min	0,8	1,7	1,2	1,9	2,0	2,7
		max	2,3	2,1	2,7	2,3	5,2	3,4
	Δa_w, %		±0,18	±0,05	±0,18	±0,05	±0,4	±0,1
PA 6.6	X, %	min	1,0	1,5	1,3	1,7	2,3	2,2
		max	2,2	1,9	2,3	2,1	4,6	2,9
	Δa_w, %		±0,15	±0,05	±0,12	±0,04	±0,3	±0,1

Uwaga: X oznacza bezwzględną ilość wody pochłoniętej przez wypraskę, natomiast Δa_w — wahania wymiaru spowodowane wahaniami higroskopijności.

$$L_K = L_T [1 - S_{wt} + \alpha_1 (t_2 - t_1) + a_w] \tag{5.15}$$

bądź

$$L_T = \frac{L_K}{1 - S_{wt} + \alpha_1 (t_2 - t_1) + a_w} \tag{5.16}$$

W obliczeniach inżynierskich zależności (5.15) i (5.16) niekiedy upraszcza się, a mianowicie:

— w wypraskach z tworzyw bezpostaciowych można pominąć wyraz S_{wt},

— w wypraskach z tworzyw bardzo mało higroskopijnych można pominąć wyraz a_w,

— w wypraskach użytkowanych w temperaturze zbliżonej do temperatury skurczu wtórnego można pominąć wyraz $\alpha_1(t_2 - t_1)$.

Analogicznie, biorąc pod uwagę rys. 5.13

$$T_K = T_T + \Delta T_K \tag{5.17}$$

Wartość ΔT_K ma także dwie składowe:

— składową ΔT_{K_t} wynikającą z wahań Δt temperatury użytkowania

$$\Delta T_{K_t} = L_K \alpha_2 \Delta t \tag{5.18}$$

gdzie α_2 oznacza współczynnik rozszerzalności liniowej tworzywa wypraski w zakresie Δt,

— składową ΔT_{K_w} wynikającą z wahań wilgotności

$$\Delta T_{K_w} = L_K \Delta a_w \tag{5.19}$$

gdzie Δa_w oznacza wahania wymiaru spowodowane wahaniami higroskopijności.

Zatem wzór (5.17) przybiera postać

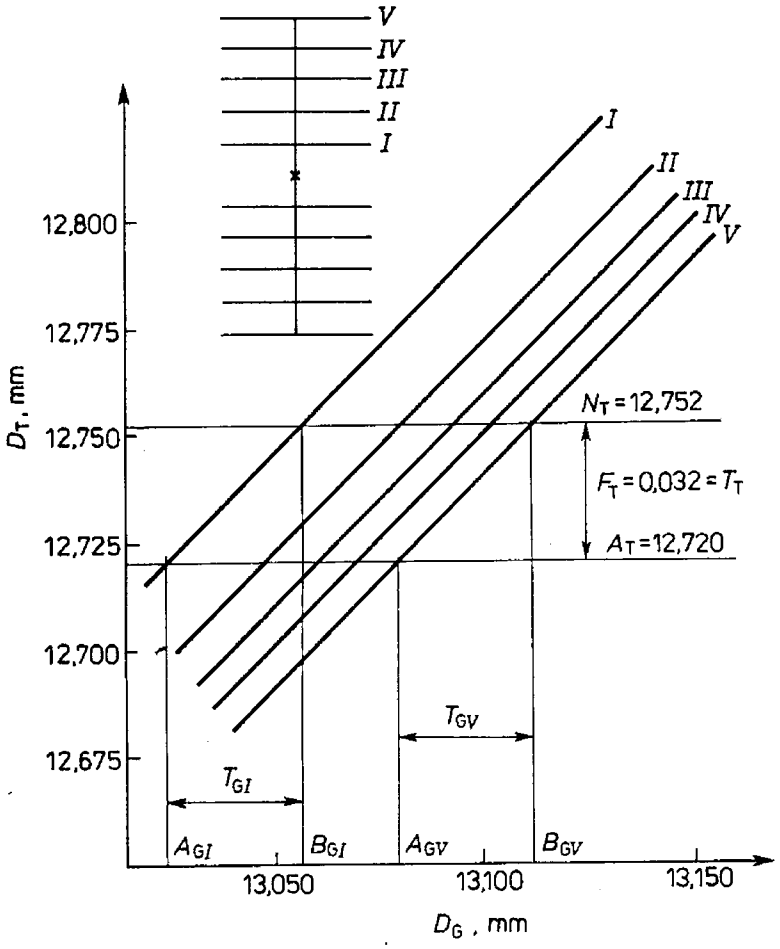
$$T_K = T_T + L_K (\alpha_2 \Delta t + \Delta a_w) \tag{5.20}$$

lub

$$T_T = T_K - L_K (\alpha_2 \Delta t + \Delta a_w) \tag{5.21}$$

Podobnie jak poprzednio, zależności (5.20) i (5.21) można niekiedy upraszczać, z tym, że jeżeli najwyższa i najniższa temperatura użytkowania są zbliżone do temperatury skurczu wtórnego, to uzasadnione staje się przyjęcie $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$.

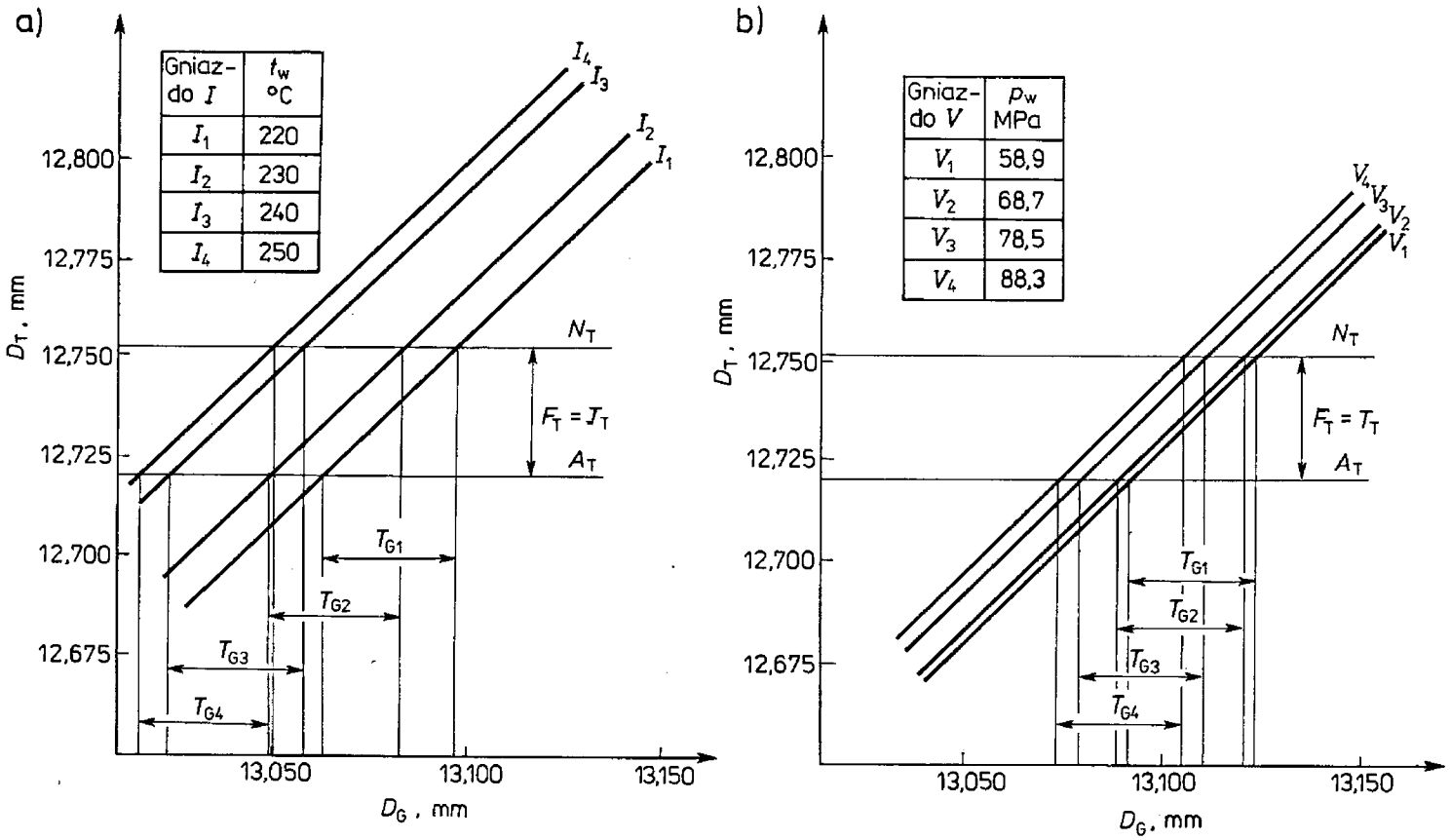
W przypadku wtryskiwania i prasowania wielogniazdowego związki pomiędzy wielkościami charakteryzującymi tolerancję wymiaru są o wiele bardziej złożone. Ich podstawą jest ustalenie zależności pomiędzy wielkościami charakteryzującymi tolerancję wymiaru gniazd oraz wyprasek z nich pochodzących.



Rys. 5.15. Zależność wielkości charakteryzujących tolerancję gniazd o różnej długości drogi przepływu tworzywa od wielkości charakteryzujących tolerancję technologiczną w przypadku precyzyjnego wtryskiwania dwudziestogniazdowego tłoczysk strzykawek lekarskich jednorazowego użytku z PE-HD (D — średnica tłoczyska) [5.107, 5.110]

Jeżeli forma wielogniazdowa ma gwiaździsty układ kanałów doprowadzających o jednakowej długości i takim samym przekroju poprzecznym, zakończonych jednakowymi przewężkami, to w każdej gałęzi układu zachodzą w istocie takie same procesy, jak już przedstawione. Jeżeli natomiast forma ma kanały o różnej długości do poszczególnych gniazd, o takim samym przekroju poprzecznym, z jednakowymi przewężkami (co jest powodowane czynnikami wykonawczymi), to ustalonym

wymiarom nominalnym, ustalonej tolerancji wymiaru i ustalonym odchyłkom wymiaru technologicznego odpowiadają różne wymiary nominalne, tolerancje wymiaru i odchyłki wymiaru gniazd, co na przykładzie precyzyjnego wtryskiwania dwudziestogniazdowego PE-HD pokazano na rys. 5.15. Gniazdo o najkrótszej drodze przepływu tworzywa odznacza się najmniejszym wymiarem nominalnym oraz najmniejszym dolnym i górnym wymiarem granicznym i odwrotnie — gniazdo o najdłuższej drodze przepływu odznacza się największym dolnym i górnym wymiarem granicznym. Na omawiane zagadnienia wpływają również parametry wtryskiwania, na przykład im wyższa temperatura wtryskiwania oraz im wyższe ciśnienie wtryskiwania, tym bardziej wielkości charakteryzujące tolerancję wymiaru gniazda przesuwają się w kierunku wartości mniejszych przy stałych wartościach wielkości charakteryzujących tolerancję wymiaru technologicznego (rys. 5.16). We wszystkich przypadkach wartość tolerancji gniazda nie ulega istotnym zmianom.



Rys. 5.16. Zależność wielkości charakteryzujących tolerancję gniazda od wielkości charakteryzujących tolerancję technologiczną przy wtryskiwaniu jak na rys. 5.15 w przypadku: a) gniazda o najkrótszej drodze przepływu i różnej temperaturze wtryskiwania, b) gniazda o najdłuższej drodze przepływu i różnym ciśnieniu wtryskiwania

5.2.3. Układ tolerancji i odchyłek

Problematyka znormalizowanych tolerancji i odchyłek wymiarów, jako bardzo ważna z utylitarnego punktu widzenia, od dawna jest przedmiotem dużego zainteresowania. W Polsce problematyką tą zajmowali się głównie: M. Axentowicz [5.4, 5.143], K. Zwierzychowski [5.10, 5.142] oraz H. Zawistowski i D. Frenkler [5.139, 5.140].

Z polskich opracowań normalizacyjnych należy odnotować normę branżową przemysłu teletechnicznego BN-68/3380-01, która ma obecnie znaczenie raczej historyczne. Z wielu norm zagranicznych na wyróżnienie zasługuje norma DIN 16901 z 1973 r. (Niemcy). Zyskała ona opinię dobrze opracowanej, w miarę kompleksowej i w związku z tym zalecanej do stosowania w Polsce [5.116, 5.139].

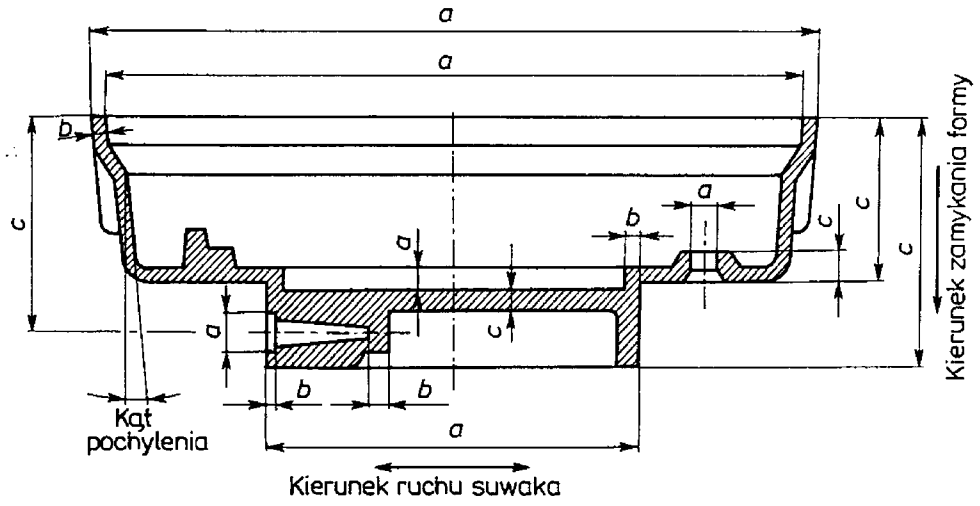
W normie DIN 16901 wyróżniono sześć grup tolerancji wymiarów technologicznych wyprasek wtryskiwanych i prasowanych w zakresie do 1000 mm (tabl. 5.3). W ramach jednej grupy występują:

1 — tolerancje wymiarów tolerowanych, niezależnych od zamknięcia formy (rys. 5.17),

2 — tolerancje wymiarów tolerowanych, zależnych od zamknięcia formy, które są powiększone przeciętnie o 0,2 mm,

3 — dopuszczalne odchyłki wymiarów nietolerowanych, niezależnych od zamknięcia formy,

4 — dopuszczalne odchyłki wymiarów nietolerowanych, zależnych od zamknięcia formy.



Rys. 5.17. Wymiary wypraski zależne i niezależne od zamknięcia formy: *a* — wymiary niezależne, *b* oraz *c* — wymiary zależne

Aby związać poszczególne tworzywa z tymi grupami tolerancji, wprowadzono *wskaźnik skurczu* W_s, definiowany następująco:

$$W_s = S_w + (S_w - S_p) \tag{5.22}$$

co umożliwiło sklasyfikowanie tworzyw termoplastycznych w przedziałach wartości wskaźnika skurczu $0 \div 1\%$, $1 \div 2\%$, $2 \div 3\%$ i $3 \div 4\%$ (tabl. 5.4). Z każdym wskaźnikiem skurczu są związane trzy grupy tolerancji, a mianowicie:

— dla wymiarów nietolerowanych,

— dla wymiarów tolerowanych, rząd 1,

— dla wymiarów tolerowanych, rząd 2.

Grupy tolerancji z rzędu 2 należy stosować w wyjątkowych przypadkach, np. przy dokładnych pasowaniach, gdyż bardzo zwiększają koszty wykonania formy. W przypadku wyprasek o grubości ścianek większych od 4 mm z tworzyw częściowo krystalicznych nienapełnionych (PE, PP, POM, PA) przyjmuje się grupy tolerancji o jeden stopień większe.

Tablica 5.3

Tolerancje i dopuszczalne odchyłki wymiarowe wyprasek z tworzyw według normy DIN 16901

Grupa tolerancji	Tolerancje i dopuszczalne odchyłki wymiarowe*)	od / do	Zakres wymiarów, mm																				
		od		1	3	6	10	15	22	30	40	53	70	90	120	160	200	250	315	400	500	630	800
		do	1	3	6	10	15	22	30	40	53	70	90	120	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
110	1		0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,26	0,3	0,34	0,4	0,48	0,58	0,7	0,86	1,06	1,3	1,6	2,0	2,5
	2		0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,36	0,4	0,44	0,5	0,58	0,68	0,8	0,96	1,16	1,4	1,7	2,1	2,6
120	1		0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,26	0,3	0,34	0,4	0,48	0,58	0,7	0,86	1,04	1,3	1,6	2,0	2,4	3,0	3,6
	2		0,32	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42	0,46	0,5	0,54	0,6	0,68	0,78	0,9	1,06	1,24	1,5	1,8	2,2	2,6	3,2	4,0
130	3		±0,08	±0,09	±0,1	±0,11	±0,13	±0,15	±0,17	±0,2	±0,24	±0,28	±0,34	±0,41	±0,5	±0,6	±0,8	±1,0	±1,2	±1,5	±1,9	±2,4	±2,9
	4		±0,19	±0,19	±0,2	±0,21	±0,23	±0,25	±0,27	±0,3	±0,34	±0,38	±0,44	±0,51	±0,6	±0,7	±0,9	±1,1	±1,3	±1,6	±2,0	±2,5	±3,0
	1		0,16	0,18	0,2	0,22	0,26	0,3	0,34	0,4	0,48	0,56	0,68	0,82	1,0	1,3	1,6	2,0	2,4	3,0	3,7	4,7	5,8
	2		0,36	0,38	0,4	0,42	0,46	0,5	0,54	0,6	10,68	0,76	0,88	1,02	1,2	1,5	1,8	2,2	2,6	3,2	3,9	4,9	6,0
140	3		±0,1	±0,11	±0,12	±0,14	±0,17	±0,2	±0,24	±0,28	±0,33	±0,4	±0,5	±0,6	±0,75	±0,95	±1,15	±1,45	±1,8	±2,2	±2,8	±3,5	±4,4
	4		±0,2	±0,21	±0,22	±0,24	±0,27	±0,3	±0,34	±0,38	±0,43	±0,5	±0,6	±0,7	±0,85	±1,05	±1,25	±1,55	±1,9	±2,3	±2,9	±3,6	±4,5
	1		0,2	0,22	0,24	0,28	0,34	0,4	0,48	0,56	0,66	0,8	1,0	1,2	1,5	1,9	2,3	2,9	3,6	4,4	5,6	7,0	8,8
	2		0,4	0,42	0,44	0,48	0,54	0,6	0,68	0,76	0,86	1,0	1,2	1,4	1,7	2,1	2,5	3,1	3,8	4,6	5,8	7,2	9,0
150	3		±0,13	±0,15	±0,17	±0,2	±0,24	±0,28	±0,33	±0,39	±0,47	±0,58	±0,71	±0,87	±1,1	±1,4	±1,7	±2,1	±2,7	±3,3	±4,2	±5,2	±6,5
	4		±0,23	±0,25	±0,27	±0,3	±0,34	±0,38	±0,43	±0,49	±0,57	±0,68	±0,81	±0,97	±1,2	±1,5	±1,8	±2,2	±2,8	±3,4	±4,3	±5,3	±6,6
	1		0,26	0,3	0,34	0,4	0,48	0,56	0,66	0,78	0,94	1,16	1,42	1,74	2,2	2,8	3,4	4,2	5,4	6,6	8,4	10,4	13,0
	2		0,46	0,5	0,54	0,6	0,68	0,76	0,86	0,98	1,14	1,36	1,62	1,94	2,4	3,0	3,6	4,4	5,6	6,8	8,6	10,6	13,2
160	3		±0,18	±0,2	±0,23	±0,27	±0,32	±0,39	±0,47	±0,56	±0,68	±0,84	±0,05	±1,3	±1,7	±2,1	±2,6	±3,2	±4,0	±5,0	±6,2	±7,8	±9,9
	4		±0,28	±0,3	±0,33	±0,37	±0,42	±0,49	±0,57	±0,66	±0,78	±0,94	±1,15	±1,4	±1,8	±2,2	±2,7	±3,3	±4,1	±5,1	±6,3	±7,9	±10,0
	1		0,36	0,4	0,46	0,54	0,64	0,78	0,94	1,12	1,36	1,68	2,1	2,6	3,4	4,2	5,2	6,4	8,0	10,0	12,3	15,6	19,8
	2		0,56	0,6	0,66	0,74	0,84	0,98	1,14	1,32	1,56	1,88	2,3	2,8	3,6	4,4	5,4	6,6	8,2	10,2	12,5	15,8	20,0
Technika precyzyjna	1		0,05	0,06	0,07	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,21	0,25	0,3	0,4								
	2		0,1	0,12	0,14	0,16	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,31	0,35	0,4	0,5								

*) Wymiary tolerowane: 1 — tolerancje wymiarów niezależnych od zamknięcia formy, 2 — tolerancje wymiarów zależnych od zamknięcia formy.
Wymiary nietolerowane: 3 — dopuszczalne odchyłki wymiarów niezależnych od zamknięcia formy, 4 — dopuszczalne odchyłki wymiarów zależnych od zamknięcia formy.

Tablica 5.4

Grupy tolerancji wyprasek z niektórych tworzyw termoplastycznych

Symbol	Tworzywo	Wskaźnik skurczu W_s, %	Grupa tolerancji dla wymiaru		
			nietolerowanego	tolerowanego	
				rząd 1	rząd 2
ABS	Kopolimer ABS	0÷1	130	120	110
CA	Octan celulozy	1÷2	140	130	120
CAB	Octanomaślan celulozy	1÷2	140	130	120
CAP	Octanopropionian celulozy	1÷2	140	130	120
PA	Poliamid 6 6.6 6.10 11 12	1÷2	140	130	120
PA+WS	Poliamidy z dodatkiem włókna szklanego	0÷1	130	120	110
PC	Poliwęglan	0÷1	130	120	110
PE	Polietylen	2÷3	150	140	130
PET	Politereftalan etylenowy bezpostaciowy	0÷1	130	120	110
PET	Politereftalan etylenowy krystaliczny	1÷2	140	130	120
PMMA	Polimetakrylan metylu	0÷1	130	120	110
POM	Poliformaldehyd (poliacetal) — długość wypraski <150 mm — długość wypraski ⩾150 mm	1÷2 2÷3	140 150	130 140	120 130
POM+WS	Poliformaldehyd z dodatkiem włókna szklanego	0÷1	130	120	110
PP	Polipropylen	2÷3	150	140	130
	Polipropylen z dodatkiem włókna szklanego, talku lub azbestu	1÷2	140	130	120
PS	Polistyren	0÷1	130	120	110
PVC twardy	Polichlorek winylu twardy	0÷1	130	120	110
PVC miękki	Polichlorek winylu zmiękczony	zależnie od ilości plastyfikatora 1÷2, 2÷3 lub 3÷4			
SAN	Kopolimer styren/akrylonitryl	0÷1	130	120	110
PS-HI	Polistyren wysokoudarowy	0÷1	130	120	110
PB	Polibuten	3÷4	160	150	140
PPO	Politlenek fenylenu	0÷1	130	120	110

5.2.4. Zapobieganie powstawaniu anomalii

Anomalie przetwórcze wytworów lub przetworów (anomalie technologiczne), dzielące się na powierzchniowe i materiałowe, w sposób bezpośredni pogarszają jakość wytworów i przetworów z tworzyw, dlatego zapobieganie powstawaniu anomalii ma szczególne znaczenie w świetle efektywnego osiągania celów przetwórstwa; są one bowiem ze swej istoty możliwe do uniknięcia. Aby skutecznie zapobiegać powstawaniu anomalii, należy najpierw je wykrywać, następnie identyfikować i wreszcie oceniać — wiążąc z warunkami przetwórstwa. W ujęciu ogólnym wymaga to aparatury, często specjalnej, oraz opracowania, jak również znormalizowania metod badań i oznaczań w tym zakresie. Wymaga to również umiejętności wiązania uzyskanych rezultatów z warunkami przetwórstwa i wpływania poprzez zmiany warunków na procesy powstawania anomalii. Często wystarcza jednak określenie cech zewnętrznych wytworów lub przetworów, które ujęte w jednoznaczne kryteria pozwalają na szybką ocenę anomalii i wskazanie na przyczyny ich powstawania. Przy takim podejściu należy opracować powiązania wspomnianych cech zewnętrznych z przyczynami powstawania anomalii i wskaźniki dopuszczalności ich występowania.

Szczególnie duże znaczenie przypisuje się problematyce *anomalii wyprasek wtryskiwanych oraz prasowanych* i jest ona stosunkowo najdokładniej opracowana. W tablicy 5.5 zestawiono i scharakteryzowano ważniejsze anomalie tych wyprasek. Podane w tablicy przyczyny powstawania anomalii zostały zakodowane w następujący sposób:

1 — za wysoka temperatura wtryskiwania bądź prasowania,
2 — za niska temperatura wtryskiwania lub prasowania,
3 — za gorąca forma,
4 — za zimna forma,
5 — uszkodzenie zespołu nagrzewającego układ uplastyczniający,
6 — za wysokie ciśnienie wtryskiwania lub prasowania,
7 — za niskie ciśnienie wtryskiwania bądź prasowania,
8 — za krótki czas docisku,
9 — za długi czas docisku,
10 — nierównomierny cykl wtryskiwania lub prasowania,
11 — za duża szybkość wtryskiwania bądź prasowania,
12 — za małe dozowanie,
13 — za duże dozowanie,
14 — zanieczyszczenia i wtrącenia obce tworzywa wejściowego,
15 — zbyt duża wilgotność tworzywa wejściowego,
16 — za mały przekrój kanałów przepływowych,
17 — za mały przekrój przewężek,
18 — niewłaściwy układ chłodzenia,
19 — niewspółosiowość części ruchomej i nieruchomej formy,
20 — niewłaściwie umieszczony wlew,
21 — wystawanie wypychaczy ponad powierzchnię formowania,
22 — niestabilny cieplnie barwnik.

Tablica 5.5

Ważniejsze anomalie wyprasek

Lp.	Rodzaj	Cechy zewnętrzne	Przyczyny powstawania	Wskaźnik dopuszczalności występowania
1	powierzchniowe	Ślady wypychaczy	1, 3, 21	dopuszczalna różnica poziomów wystawania lub zagłębienia w mm
2		Wtrącenia zanieczyszczeń	14, 15, 22	liczba i rozmiary wtrąceń na danym polu powierzchni
3		Odbarwienia	5, 11, 17, 22	stopień dopuszczalności różnicy odcieni
4		Linie przepływu, ślady połączeń strumieni tworzywa	4, 7, 16, 17, 18	dopuszczalne dla niektórych tworzyw (np. PE) i w przypadku uzasadnionym (np. w wypraskach z otworami)
5		Zmatowienia	2, 4, 7, 12, 15	pole powierzchni dopuszczalnej występowania zjawiska
6		Ciemne smugi, zarysowania powierzchni	1, 10, 14	liczba i długość smug i zarysowań na powierzchni ważnej i mniej ważnej
7	materiałowe	Rąbek wtryskowy lub prasowniczy	1, 6, 11, 13	wysokość i grubość w mm
8		Błędy kształtu i położenia nie mieszczące się w tolerancjach (z wyjątkiem poz. 9)	1, 3, 6, 9, 10, 13, 17, 18, 20	odchyłki dopuszczalne w mm
9		Zapadnięcia, wklęśnięcia powierzchni	1, 3, 7, 8, 10, 12 16, 17, 20	odchyłki dopuszczalne w mm
10		Nierównomierność grubości ścianek	19, 20	graniczne przecienienie określone w stosunku do grubszej ścianki np. wyrażone w procentach

Zapadnięcia i wklęśnięcia powierzchni stanowią w istocie błędy kształtu nie mieszczące się w tolerancjach, jednak ze względu na stosunkowo częste występowanie, duże znaczenie i w znacznym stopniu odrębne przyczyny powstawania niż błędów kształtu, zostały w tabl. 5.5 ujęte tradycyjnie oddzielnie.

W warunkach produkcyjnych korzystanie z tabl. 5.5, ze względu na pewien stopień jej ogólności, nie zawsze okazuje się efektywne. W przypadku wyprasek wtryskiwanych dysponuje się [5.116] bardziej szczegółowymi zależnościami pomiędzy ich anomaliami podzielonymi na 18 rodzajów i przyczynami powstawania anomalii, ujętymi w 4 grupy: warunki wtryskiwania (temperatura, ciśnienie i czas), tworzywo, forma oraz wtryskarka (tabl. 5.6).

Anomalie są również przedmiotem opracowań normalizacyjnych. W Polsce opracowano normę PN-75/M-89110 (arkusze $1 \div 20$) dotyczącą nazw i określeń anomalii

Tablica 5.6

Anomalie wyprasek wtryskiwanych i ważniejsze przyczyny ich powstawania

Lp.	Anomalie wyprasek / Przyczyny powstawania anomalii	Zapadnięcia i wklęśnięcia	Srebrne smugi	Wewnętrzne pęcherze	Ciemne smugi	Linie połączeń tworzywa	Matowa powierzchnia wypraski	Rąbek wtryskowy	Trudność usunięcia z formy	Niezupełne wypełnienie gniazda	Deformacja wypraski	Przypalenie	Pasma na obwodzie	Efekt płyty gramofonowej	Łuszczenie się powierzchni	Kruchość i łamliwość wypraski	Ślady wypychaczy	Nierównomierność grubości ścianek	Odbarwienia
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	I. Warunki wtryskiwania																		
	Temperatura																		
1	Wysoka temperatura wtryskiwania	x	x	x	x			x	x		x	x	x		x	x	x		
2	Niska temperatura wtryskiwania						x			x				x		x			
3	Gorąca forma	x		x							x						x		
4	Zimna forma		x			x	x		x	x					x	x			
5	Defekt zespołu grzejnego cylindra									x									x
6	Zimna dysza			x						x									
7	Niewłaściwie dobrana wydajność uplastyczniania																		
	Ciśnienie																		
8	Ciśnienie wtryskiwania za wysokie							x	x		x				x				
9	Ciśnienie wtryskiwania za niskie	x		x		x	x			x				x					
	Czas																		
10	Czas docisku za krótki	x		x															
11	Czas docisku za długi								x		x					x			
12	Nierównomierność cyklu	x			x						x								
13	Szybkość wtryskiwania za duża		x	x				x				x	x		x				x

c.d. tablicy 5.6

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	II. Tworzywo																		
14	Dozowanie za małe	x		x			x			x				x					
15	Dozowanie za duże							x	x		x								
16	Zanieczyszczenia, obce wtrącenia				x							x							
17	Wilgotne tworzywo		x	x			x								x	x			
18	Zła płynność (mały wskaźnik szybkości płynięcia)					x													
19	Duży skurcz					x					x								
20	Niestabilny cieplnie barwnik											x	x						x
21	Mieszanina dwóch różnych tworzyw														x	x			
	III. Forma																		
22	Mały przekrój kanałów doprowadzających	x	x	x		x				x									
23	Mały przekrój przewężek	x	x	x		x				x	x								x
24	Mała średnica tulejki wlewka	x	x	x						x									
25	Niewłaściwy układ chłodzenia					x				x	x							x	
26	Niewspółosiowość stempla i matrycy	x						x			x					x		x	
27	Niewłaściwie umieszczony wlew									x	x								
28	Złe przyleganie płaszczyzn podziału		x								x						x		
29	Niewypolerowana powierzchnia formująca						x		x										
30	Niewystarczająca zbieżność powierzchni formujących							x		x		x							
31	Wystawianie wypychaczy nad powierzchnię formowania					x											x		
32	Powstawanie próżni pod wypraską			x		x			x	x		x							
33	Zły układ odpowietrzania									x							x		
34	Podcięcia na częściach kształtujących																		
	IV. Wtryskarka																		
35	Duży luz ślimaka w cylindrze											x							
36	Przeciekający cylinder wtryskowy											x							
37	Mały otwór dyszy							x		x				x					
38	Niskie ciśnienie zamykania formy																		

w odniesieniu do wyprasek wtryskiwanych i prasowanych, wytłoczyn, odlewów, laminatów, folii, powłok, połączeń zgrzewanych, spawanych i klejowych, kształtek i innych wytworów. Trzeba jednak zauważyć, że ustalenia wymienionej normy budzą niekiedy uwagi krytyczne, np. chropowatość i falistość powierzchni nie mogą być traktowane jako anomalie (nazywane wadami technologicznymi), należą bowiem do wielkości charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni.

W niektórych przypadkach anomalie są przedmiotem specyficznych i bardzo szczegółowych opracowań, np. anomalie połączeń zgrzewanych rur ciśnieniowych.

5.2.5. Przykłady obliczeniowe

Przykład 5.1. Wypraska z PA 6 ma tolerowany wymiar konstrukcyjny $100 \pm 0{,}5$ mm oraz grubość ścianki 4 mm. Po wtryskiwaniu była ona przechowywana w temperaturze $t_1 = 20°C$, a ma być użytkowana w hali maszyn w temperaturze $t_2 = 60°C$, przy czym wahania temperatury użytkowania wynoszą $\Delta t = \pm 10°C$. Skurcz wtórny $S_{wt} = 0{,}003$ mm/mm, współczynnik rozszerzalności liniowej $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = 8 \cdot 10^{-5}$ 1/K. Obliczyć tolerowany wymiar technologiczny.

Rozwiązanie. Obliczenia należy rozpocząć od wyznaczenia poprawki a_w wymiaru na higroskopijność. Z tablicy 5.2 odczytuje się dla grubości ścianki wypraski 4 mm: $X_{min} = 1{,}2\%$ oraz $X_{max} = 2{,}7\%$, zatem

$$X_{ś} = \frac{X_{min} + X_{max}}{2} = \frac{1{,}2 + 2{,}7}{2} = 1{,}95\%$$

a na podstawie wzoru (5.11)

$$a_w = \frac{1{,}95}{4} = 0{,}5\% = 0{,}005 \text{ mm/mm}$$

Wahania wymiaru spowodowane wahaniami higroskopijności wynoszą (tabl. 5.2)

$$\Delta a_w = \pm 0{,}18\% = 0{,}36\% = 0{,}0036 \text{ mm/mm}$$

Można teraz wyznaczyć nominalną wartość wymiaru technologicznego L_T, korzystając ze wzoru (5.16). Zatem po podstawieniu danych liczbowych

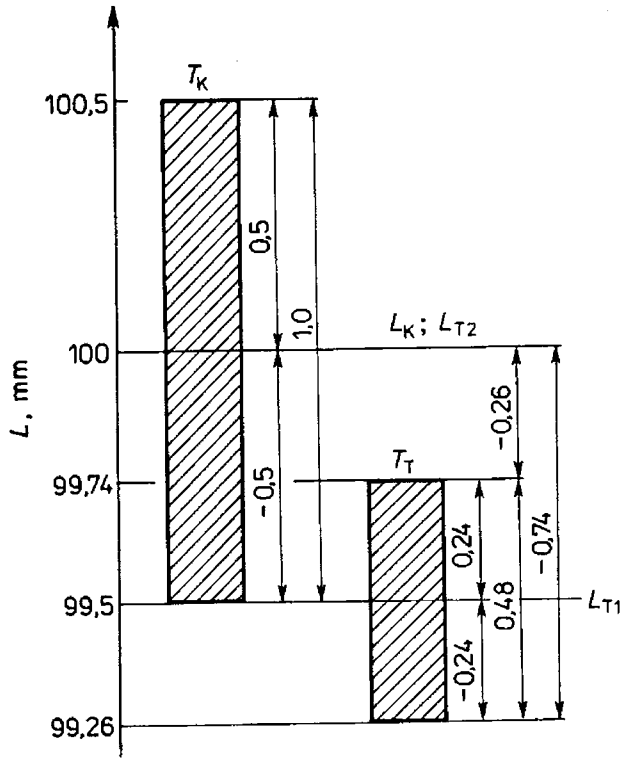
$$L_T = \frac{100}{1 - 0{,}003 + 8 \cdot 10^{-5}(60 - 20) + 0{,}005} = 99{,}5 \text{ mm}$$

Tolerancja konstrukcyjna wynosi $T_K = \pm 0{,}5$ mm $= 1$ mm. Tolerancję technologiczną wyznacza się ze wzoru (5.21). Zatem

$$T_T = 1{,}0 - 100(8 \cdot 10^{-5} \cdot 20 + 0{,}0036) = 0{,}48 \text{ mm}$$

Przyjmując symetryczny rozkład tolerancji 0,48 mm $= \pm 0{,}24$ mm, tolerowany wymiar technologiczny wynosi $99{,}5 \pm 0{,}24$ mm lub przyjmując, że nominalny wymiar technologiczny powinien być identyczny z konstrukcyjnym, co powoduje niesymetryczny rozkład tolerancji, tolerowany wymiar technologiczny wynosi $100^{-0{,}26}_{-0{,}74}$ mm. Na rysunku 5.18 pokazano rozkład pól tolerancji z zaznaczonymi wielkościami charakterystycznymi.

Rys. 5.18. Rozkład pól tolerancji wymiaru z zaznaczonymi wielkościami charakterystycznymi do przykładu obliczeniowego 5.1



Przykład 5.2. Wypraska z POM ma otwór o średnicy Ø20H11. Po wtryskiwaniu była ona przechowywana w temperaturze $t_1 = 25°C$, a zamierza się ją użytkować w pomieszczeniu zamkniętym w temperaturze $t_2 = 65°C$, wahającej się w zakresie $\Delta t = \pm 10°C$. Skurcz wtórny $S_{wt} = 0{,}001$ mm/mm, współczynnik rozszerzalności liniowej w zakresie temperatury $25 \div 65°C$ wynosi $\alpha_1 = 1{,}2 \cdot 10^{-4}$ 1/K, natomiast w zakresie $55 \div 75°C$ wynosi $\alpha_2 = 1{,}3 \cdot 10^{-4}$ 1/K, poprawka wymiaru na higroskopijność $a_w = 0{,}0006$, a wahania wymiaru spowodowane wahaniami higroskopijności $\Delta a_w = 0{,}0005$. Obliczyć tolerowany wymiar technologiczny.

Rozwiązanie. Mając na uwadze ustalenia międzynarodowego układu tolerancji i pasowań ISO (zgodnie z PN-89/M-02102 oraz PN-91/M-02104), wymiar Ø20H11 można zapisać jako $Ø20^{+0,13}$ lub jako $Ø20{,}065 \pm 0{,}065$ mm.

Wartość wymiaru technologicznego obliczonego z zależności (5.16), po podstawieniu danych liczbowych, wynosi

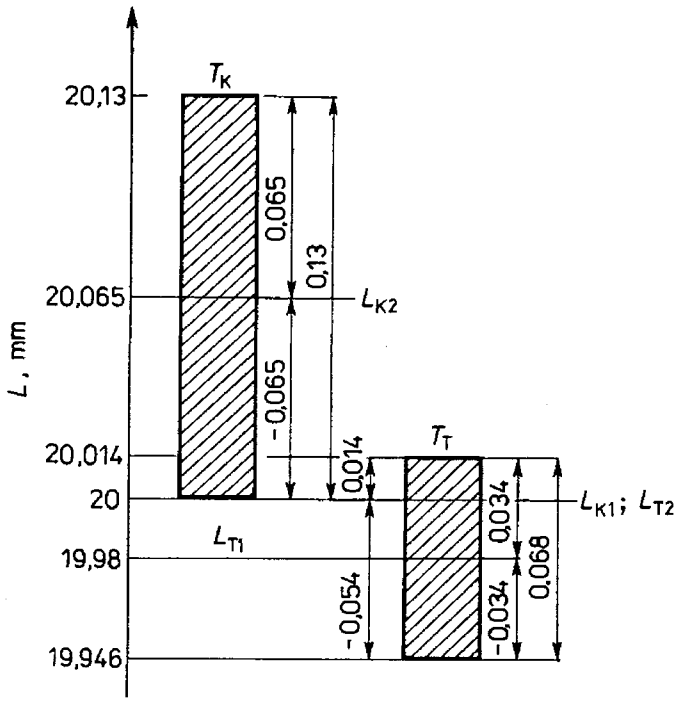
$$L_T = \frac{20{,}065}{1 - 0{,}001 + 1{,}2 \cdot 10^{-4}(65 - 25) + 0{,}0006} = 19{,}98 \text{ mm}$$

Tolerancja konstrukcyjna $T_K = \pm 0{,}065$ mm $= 0{,}13$ mm. Tolerancja technologiczna, na podstawie wzoru (5.21), wynosi

$$T_T = 0{,}13 - 20{,}065(1{,}3 \cdot 10^{-4} \cdot 20 + 0{,}0005) = 0{,}068 \text{ mm}$$

Jeżeli tolerancja ma rozkład symetryczny, tj. 0,068 mm $= \pm 0{,}034$ mm, to tolerowany wymiar technologiczny wynosi $Ø19{,}98 \pm 0{,}034$ mm, bądź gdy nominalny wymiar technologiczny powinien mieć taką samą wartość, jak nominalny wymiar konstrukcyjny, co pociąga za sobą niesymetryczny rozkład tolerancji, wówczas tolerowany wymiar technologiczny wynosi $Ø20^{+0,014}_{-0,054}$ mm. Z tablicy 5.3 wynika, że dla wykonania

precyzyjnego $T_T = 0{,}12$ mm, a więc $T_{T\,tabl} > 0{,}068$ mm i wtryskiwanie wypraski przy założonej tolerancji konstrukcyjnej jest utrudnione. Rozkład pól tolerancji z zaznaczonymi wielkościami charakterystycznymi przedstawiano na rys. 5.19.



Rys. 5.19. Rozkład pól tolerancji wymiaru z zaznaczonymi wielkościami charakterystycznymi do przykładu obliczeniowego 5.2

5.3. Warunki przetwórstwa

Pod pojęciem *warunków przetwórstwa* rozumie się wielkości fizyczne i chemiczne determinujące przebieg i efekty przetwórstwa. Szczególne znaczenie mają te warunki, które dobiera się i następnie nastawia ich wartości na maszynie, narzędziach i urządzeniach uzupełniających. Niektóre warunki tylko się dobiera, np. wilgotność tworzywa wejściowego i sposób przygotowania powierzchni. W tym rozumieniu warunki przetwórstwa można podzielić na:

a) *cieplne*, np. temperatura, gradient temperatury, dyfuzyjność cieplna, strumień ciepła, gęstość strumienia ciepła, ilość ciepła;

b) *reologiczne*, np. natężenie przepływu, szybkość ścinania, szybkość rozciągania, naprężenie styczne, lepkość dynamiczna, granica płynięcia;

c) *kinematyczne*, np. kierunek ruchu, prędkość liniowa, prędkość obrotowa, prędkość kątowa;

d) *dynamiczne*, np. masa całkowita, masa jednostkowa, siła, ciśnienie, naprężenie, energia całkowita, energia jednostkowa, moc;

e) *fizykochemiczne*, np. gęstość, sposób przygotowania powierzchni, energia powierzchniowa, napięcie powierzchniowe, zwilżalność powierzchni;

f) *chemiczne*, np. rodzaj i technika polimeryzacji, liczba grup aktywnych, rodzaj wolnych rodników;

g) *geometryczne*, np. wymiar liniowy, pole powierzchni, chropowatość powierzchni, falistość powierzchni, kąt, objętość całkowita;

h) *inne*, np. czas, wilgotność.

Nie wszystkie warunki przetwórstwa odgrywają jednakową rolę we wszystkich metodach przetwórstwa, np. w przetwórstwie tworzyw termoplastycznych nie występują warunki chemiczne lub — jeżeli występują — mają małe znaczenie, często pomijalne. Poza tym warunki przetwórstwa występujące w danej metodzie w sposób niejednakowy determinują przebieg i efekty przetwórstwa, np. w procesie wytłaczania i wtryskiwania największe znaczenie mają: temperatura, ciśnienie i czas, mniejsze znaczenie: zwilżalność powierzchni i prędkość liniowa, a najmniejsze — granica płynięcia.

Trzeba dodać, że w literaturze spotyka się również pojęcie *parametrów przetwórstwa*. Zwykle rozumie się pod nim ściśle określone warunki przetwórstwa w danej metodzie przetwórstwa lub w jej odmianie, bez względu na sposób ich uzyskania; np. można mówić, że parametrem określonego wtryskiwania jest temperatura bądź że parametr ten (temperatura) ma wartość 240°C.

5.3.1. Podstawy doboru optymalnych warunków przetwórstwa

Warunki przetwórstwa jako wielkości fizyczne i chemiczne nie tylko determinują przebieg i efekty przetwórstwa, ale także wiele z nich jest powiązanych funkcyjnie ze sobą, tzn. zmiana jednego warunku pociąga za sobą zmianę innych. Najwięcej powiązań ma temperatura, która charakteryzuje się powiązaniami funkcyjnymi niemal ze wszystkimi pozostałymi warunkami. W związku z tym dobierając bezpośrednio jeden warunek przetwórstwa — wyznacza się pośrednio, mniej lub bardziej dokładnie, inne warunki przetwórstwa powiązane z nim funkcyjnie, a przez to determinuje się przebieg i efekty przetwórstwa.

Racjonalny dobór warunków przetwórstwa powinien uwzględniać: wymagania techniczne i estetyczne stawiane wytworom i przetworom z tworzyw, możliwości przetwórcze danej metody i maszyny przetwórczej oraz zdolności przetwórcze narzędzia, jak również ekonomię przetwórstwa.

Wymagania techniczne, np. wymiary, kształt, stan geometryczny i energetyczny powierzchni, wytrzymałość mechaniczna, trwałość, niezawodność, palność, odporność na starzenie pod wpływem różnych czynników, rezystywność powierzchniowa, i estetyczne, np. wygląd ogólny, kolor, połysk, stawiane są wytworom i przetworom podczas ich projektowania. W praktyce sprowadzają się one na ogół do określenia rodzaju i odmiany tworzywa, wskazania metody i odmiany przetwórstwa, ustalenia tolerancji bądź dopuszczalnych odchyłek wymiaru, kształtu i położenia, jak również określenia właściwości warstwy wierzchniej, a zwłaszcza struktury geometrycznej powierzchni.

Ekonomia przetwórstwa polega na jak najmniejszym zużyciu tworzyw przetwarzanych, materiałów narzędziowych i pomocniczych oraz energii, jak najkorzystniejszej utylizacji odpadów, jak najmniejszej pracochłonności i czasochłonności oraz jak najmniejszym koszcie jednostkowym produkcji.

Dobierając warunki przetwórstwa dla określonej metody przetwórstwa dąży się do tego, aby były one optymalne*) przede wszystkim ze względu na efekty przetwórstwa, natomiast optymalizacja ze względu na przebieg przetwórstwa ma na ogół nieco mniejsze znaczenie.

Do *wielkości optymalizowanych* w procesie przetwórstwa należą głównie:

— jakość wytworu lub przetworu, która powinna wynikać z warunków ich użytkowania i powinna być zadana lub jest optymalizowana,

— wydajność procesu przetwórstwa, która powinna być maksymalizowana,

— jednostkowe zużycie energii w procesie przetwórstwa, które powinno być minimalizowane,

— praco- i czasochłonność procesu przetwórstwa, które powinny być minimalizowane,

— koszt jednostkowy wytworu i przetworu, czyli koszt otrzymania jednostki wytworu lub przetworu, który powinien być minimalizowany.

Wymienione wielkości przyjmują rolę *kryteriów optymalizacji*. Jeżeli optymalizację prowadzi się według jednego kryterium, to nazywa się ją *optymalizacją jednokryterialną*, jeżeli zaś jednocześnie według dwu kryteriów, to nosi ona nazwę *dwukryterialnej* i wreszcie jeżeli prowadzi się ją według wielu kryteriów jednocześnie, to nazywa się *wielokryterialną* lub *polioptymalizacją* [5.93].

Optymalizacja procesów przetwórstwa w ścisłym tego słowa znaczeniu obejmuje następujące podstawowe etapy.

Pierwszym etapem jest opracowanie lub doskonalenie jakościowego, fizyczno-logicznego (cybernetycznego) modelu rozważanego zjawiska lub zależności. Niezbędne w tym celu jest wykorzystanie dotychczasowej wiedzy oraz studiowanie literatury (bieżąco uzupełnianej), związanej z danym zjawiskiem.

W drugim etapie konieczne jest zbadanie zależności i poznanie praw rządzących danym zjawiskiem. Na tej podstawie należy dokonywać aproksymacji matematycznej, możliwe najwierniej przedstawiającej fizyczną istotę zjawiska.

Z kolei w trzecim etapie, mając już do dyspozycji aproksymację, tworzy się matematyczny model optymalizacji, czyli tworzy się funkcję celu optymalizacji, która będzie poddawana procedurom optymalizacyjnym. Funkcja ta w przypadku ogólnym procesów przetwórstwa, na które wpływają dowolne warunki α_k, ma postać

$$K = f(\alpha_k) \qquad \text{dla} \quad k = 1, 2, \ldots, n \tag{5.23}$$

W czwartym etapie przystępuje się do opracowania algorytmu, służącego za podstawę do programowania niezbędnych obliczeń.

Piątym etapem jest opracowanie programu w języku komputera będącego do dyspozycji. Etap ten mogą wykonywać już sami informatycy.

Na podstawie opracowanego programu następuje realizacja szóstego etapu, podejmującego przeprowadzenie obliczeń i analizę wyników.

---

*) Optymalizacją w szerokim znaczeniu tego pojęcia nazywa się otrzymanie najkorzystniejszych wyników ze względu na przyjęte kryteria w danych warunkach. Z pojęciem tym wiąże się wiele nieporozumień. Używane ono bywa często niewłaściwie, np. w języku potocznym i w środkach społecznego przekazu jako jeden z symboli nowoczesności oraz zastępuje takie pojęcia, jak: korzystny, właściwy, dobry, doskonały.

Ostatnim, siódmym etapem, jest przygotowanie sposobów oddziaływania na optymalny przebieg procesu przetwórstwa, np. poprzez opracowanie instrukcji, wytycznych i nomogramów oraz ich zastosowanie.

Scharakteryzowany tok optymalizacji w etapach jest czasochłonny i w zasadzie może być przeprowadzony w jednostkach przygotowanych do tego celu. W związku z tym w praktyce stosuje się często różne uproszczenia optymalizacyjne, a postępowanie takie nazywa się *optymalizacją częściową*.

Przeprowadzając optymalizację procesów przetwórstwa nie można niektórych warunków zmieniać dowolnie. Zasadniczo istnieje zakres wartości zmienności warunków przetwórstwa, wynikający z istoty danej metody, np. temperatura wtryskiwanego tworzywa termoplastycznego musi być niższa od temperatury rozkładu cieplnego tworzywa i wyższa od minimalnej temperatury umożliwiającej żądany przepływ tworzywa, natomiast ciśnienie musi być zawarte pomiędzy ciśnieniem wynikającym z powiązania funkcyjnego z temperaturą a ciśnieniem, jakie może być wytworzone przez układ uplastyczniający wtryskarki. Innym czynnikiem ograniczającym dobór warunków przetwórstwa jest konstrukcja narzędzia i maszyny, np. sztywność konstrukcji, moc grzejników, moc silników napędowych, określone elementy geometryczne i wymiary ślimaka oraz cylindra.

Z podanych wiadomości wynika, że możliwości optymalizacji warunków przetwórstwa nie są bardzo rozległe, ale wystarczająco duże. Optymalizacja jest konieczna do racjonalnego i efektywnego prowadzenia przetwórstwa oraz dalszego jego rozwoju. Obecnie bowiem warunki przetwórstwa dobiera się z punktu widzenia jego efektów założonych na podstawie danych, które na ogół mają charakter orientacyjny, ujętych we wzory matematyczne, tablice, wykresy i nomogramy. Konkretne wartości liczbowe nastawianych parametrów charakteryzujących warunki przetwórstwa często dobiera się na podstawie wymienionych danych i nabytych doświadczeń oraz następnie koryguje za pomocą prób w danych warunkach dla ściśle określonego tworzywa, narzędzia, maszyny, urządzeń uzupełniających itp.

5.3.2. Warunki spajania, porowania i suszenia

Spajalność (*zgrzewalność i spawalność*) tworzyw jest bardzo różna; zależy przede wszystkim od rodzaju tworzywa spajanego oraz odmiany zgrzewania i spawania. Orientacyjne dane w tym zakresie zawiera tabl. 5.7. Na jej podstawie można wybrać wstępnie dla danego tworzywa zalecaną odmianę zgrzewania i spawania.

Warunki zgrzewania dobiera się, zgodnie z wiadomościami podanymi w poprzednim punkcie, na podstawie danych mających często charakter bardziej ogólny. Na ogół w zależności od rodzaju tworzywa zgrzewanego dobiera się: temperaturę zgrzewania, czas zgrzewania, nacisk przy nagrzewaniu oraz docisk podczas łączenia. W przypadku poszczególnych odmian zgrzewania wymienione warunki modyfikuje się do wartości charakterystycznych dla danej odmiany, np. w przypadku zgrzewania za pomocą nagrzanego klina, płyty lub innego podobnego narzędzia, dobiera się temperaturę narzędzia i wymienione już warunki zgrzewania (tabl. 5.8), natomiast w przypadku zgrzewania tarciowego dobiera się, oprócz podanych warunków, prędkość elementu zgrzewanego (tabl. 5.9).

Spajalność niektórych tworzyw [5.14, 5.64]

Tablica 5.7

Odmiana spajania	Rodzaj tworzywa spajanego						
	PVC PC	PE PB PP	POM	PS	PA 6	PMMA	CA CAB CAP
Zgrzewanie							
Za pomocą nagrzanego narzędzia	+	+	+	+	+	0	0
Impulsowe	0	+	0	+	+	—	0
Tarciowe	+	+	+	+	+	0	0
Drganiowe	+	+	+	+	+	+	+
Pojemnościowe	+	—	—	—	+	+	—
Ultradźwiękowe	+	+	+	+	+	+	+
Indukcyjne	0	+	+	+	0	—	0
Spawanie							
W strumieniu gorącego gazu	+	+	+	+	0	+	0
Połączone z wytłaczaniem pręta spawalniczego	—	+	—	—	—	—	—

Uwaga: Znak + oznacza dobrą spajalność, 0 — spajalność z zastrzeżeniem (zmniejszona wytrzymałość złącza), — — złą spajalność lub jej brak.

Tablica 5.8

Warunki zgrzewania niektórych tworzyw za pomocą nagrzanego klina, płyty lub innego narzędzia [5.14]

Rodzaj zgrzewu	Rodzaj tworzywa	Temperatura powierzchni elementu grzejnego, °C	Czas nagrzewania s	Nacisk jednostkowy przy nagrzewaniu MPa	Docisk jednostkowy przy łączeniu MPa
Doczołowy	PE-LD	170÷190	20÷60	0,05	0,10
	PE-HD	200÷240	30÷60	0,05	0,15
	PP	210÷230	30÷120	0,075	0,15
	PB	220÷240	30÷60	0,05	0,20
	PVC twardy	210÷235	20÷60	0,075	0,20
	PVC zmiękczony				
	PS	190÷240	20÷60	0,025	0,06
	POM	210÷230	10÷30	0,03	0,05
Kielichowy	PE-HD	260÷310	10÷15		
	PP	250÷310	20÷30		
	PB	320÷330	10÷14		

Uwaga: Dane liczbowe dotyczą przedmiotów o grubości mniejszej niż 20 mm.

Często zachodzi zgrzewanie rur ciśnieniowych, np. z PE o średnicy 20÷240 mm do przesyłania gazu ziemnego lub wody pitnej. W tych przypadkach zgrzewanie prowadzi się w warunkach polowych, w których dobór warunków zgrzewania napotyka dodatkowe ograniczenia, wynikające z charakteru i organizacji prac, których elementem jest zgrzewanie. W każdym przypadku musi ono spełniać wymagania jakościowe, przede wszystkim w zakresie wytrzymałości i szczelności długotrwałej. Ustalenia parametrów zgrzewania dokonuje się na podstawie takich danych, jak w tabl. 5.8 i 5.9, korygowanych doświadczalnie z uwzględnieniem wymienionych czynników.

Tablica 5.9

Warunki zgrzewania tarciowego niektórych tworzyw

Rodzaj tworzywa	Prędkość obwodowa m/s	Docisk jednostkowy przy łączeniu, MPa
PE-LD	1,5÷3,0	0,2÷0,5
PP	1,5÷3,0	0,2÷0,5
PVC twardy	1,7÷2,5	0,3÷0,8
PMMA	3,0÷6,0	0,5÷0,9
POM	0,2÷0,4	0,6÷1,0
PA	1,5÷9,0	0,5÷1,0

Warunki spawania w strumieniu gorącego gazu obejmują głównie temperaturę gazu i prędkość przesuwania dyszy palnika, czyli prędkość spawania. Warunki te dobiera się w zależności od rodzaju tworzywa spawanego i rodzaju dyszy palnika (tabl. 5.10).

Tablica 5.10

Warunki spawania niektórych tworzyw w strumieniu gorącego gazu [5.14]

Rodzaj tworzywa	Temperatura gazu, °C	Prędkość spawania, mm/s	
		dyszą standardową okrągłą	dyszą szybkościową
PE-LD	210÷230	2,0÷3,3	8,3÷11,7
PE-HD	230÷250	2,0÷3,3	6,7÷10,0
PP	250÷300	2,5÷4,2	8,3÷11,7
PVC twardy	230÷250	2,5÷4,2	8,3÷11,7
PS-HI	240÷290	2,5÷4,2	8,3÷11,7
POM	250÷270	2,0÷2,5	6,7÷10,0

Tablica 5.11

Charakterystyka procesu formowania rozrostowego PS

Gęstość pozorna PS porowatego kg/m³	Objętość 100 g granulatu po wstępnym rozrastaniu, dm³	Czas		
		rozrastania wstępnego w wodzie o temperaturze 95°C, min	suszenia po rozrastaniu wstępnym w powietrzu o temperaturze 20°C, h	maksymalny od rozrastania wstępnego do formowania ostatecznego, h
200÷100	0,5÷1	0,4÷1	1	—
100÷50	1÷2	0,5÷3	6	48
20÷15	5÷66	—	48	336
16÷10	—	15	72÷168	336

Warunki porowania — formowania rozrostowego — w sposób istotny zależą od rodzaju tworzywa poddawanego procesowi i żądanej gęstości pozornej. Przykład zależności w tym zakresie w odniesieniu do polistyrenu podano w tabl. 5.11. Należy dodać, że ochładzanie form z gotowym przedmiotem porowatym odbywa się za pomocą wody lub powietrza, z tym, że jeżeli gęstość pozorna jest mniejsza od 25 kg/m^3, stosuje się tylko ochładzanie powietrzem, które jako mniej intensywne zmniejsza i stabilizuje skurcz przetwórczy.

Warunki suszenia obejmują przede wszystkim: wilgotność tworzywa suszonego, temperaturę suszenia i czas suszenia. Dobiera się je, podobnie jak warunki spajania i porowania, na podstawie takich danych, jak zawarte w tabl. 5.12. Szczególne znaczenie ma temperatura suszenia — jej obniżenie wydłuża czas suszenia, podwyższenie zaś wprawdzie skraca czas suszenia, lecz może doprowadzić do rozkładu cieplnego tworzywa (depolimeryzacji, degradacji lub destrukcji). Zalecane temperatury tworzywa ujęte w tabl. 5.12 mogą być podwyższone w przypadku stosowania jako czynnika suszącego gazów nieutleniających (np. N_2 lub CO_2) bądź w przypadku suszenia w częściowej próżni.

Tablica 5.12

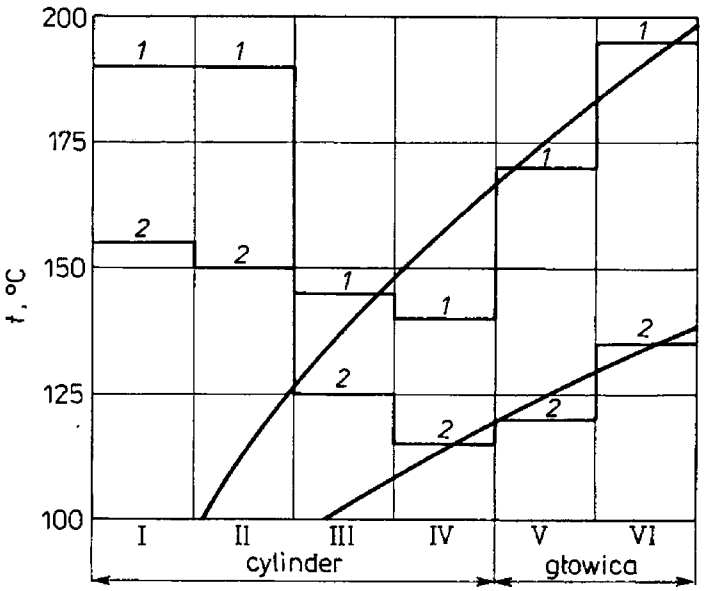
Charakterystyka suszenia niektórych tworzyw [5.80]

Rodzaj tworzywa	Największa wilgotność w temperaturze 20°C, %	Dopuszczalna zawartość wilgoci przy przetwórstwie, %	Zalecana temperatura suszenia, °C	Minimalny czas suszenia, h
SAN	0,45	0,05÷0,1	80	1÷2 (0,45)
ABS	1,0	0,05÷0,1	80	1÷2 (1,0)
POM	0,3	0,2	80÷100	2÷3 (0,3)
PMMA	0,3	0,02÷0,1	60÷80	5 (0,4)
PVC twardy	0,3	0,08÷0,3	60÷65	1÷2 (0,3)
PET	0,3÷0,4	0,01	70÷160	3÷4 (0,3)
PA 6	10,5	0,05÷0,2	75	4÷5 (1,0)
PA 6,6	10	0,05÷0,2	85	4÷5 (1,0)
PA 11	1,6	0,05÷0,2	100	4÷5 (1,0)
PA 12	1,5	0,15	100	5 (1,0)
PC	0,15÷0,5	0,015	120	2÷3 (0,5)
PSU	0,5÷1,8	0,05	120	2÷3 (0,5)
CA	2,0÷6,5	0,1÷0,2	70÷85	2÷3 (0,5)

Uwaga: W nawiasach w ostatniej kolumnie podano wartości wilgotności początkowej.

5.3.3. Warunki wytłaczania

Podstawowymi warunkami wytłaczania są przede wszystkim: rozkład temperatury tworzywa wzdłuż długości układu uplastyczniającego i głowicy oraz ciśnienie tworzywa przed głowicą. Wielkości te zależą nie tylko od rodzaju tworzywa wytłaczanego, ale również od rozwiązania konstrukcyjnego układu uplastyczniającego i głowicy oraz od rodzaju wytłoczyny. Warunki wytłaczania podaje się w postaci wykresów rozkładu temperatury cylindra i głowicy wzdłuż ich długości lub w formie zestawień tabelaryczz-



Rys. 5.20. Rozkład temperatury wzdłuż długości układu uplastyczniającego i głowicy podczas wytłaczania dwuślimakowego PVC zmiękczonego: *1* — temperatura cylindra w poszczególnych strefach grzejnych (I÷IV) i głowicy (korpus V, dysza VI) wytłaczarek stożkowych 2T/4,5, 2T14/8 i 2T13/6 przy wytłaczaniu rur, *2* — jak poprzednio, lecz dla wytłaczarki walcowej 2T14 przy wytłaczaniu z granulowaniem; na rysunku pokazano również orientacyjny przebieg temperatury tworzywa w obu przypadkach (na podstawie informacji z OBR Metalchem w Toruniu z października 1990 r.)

nych. W tablicach 5.13, 5.14 i 5.15 zestawiono przykładowo orientacyjne warunki wytłaczania jednoślimakowego niektórych tworzyw podczas wytwarzania rur, płyt i folii [5.70], a na rys. 5.20 rozkład temperatury podczas wytłaczania dwuślimakowego PVC zmiękczonego. Na podstawie takich danych nastawia się temperaturę poszczególnych stref grzejnych w cylindrze i głowicy. Trzeba w tym miejscu zwrócić uwagę na różnicę pomiędzy temperaturą wytłaczania i temperaturą cylindra lub głowicy. Otóż temperatura wytłaczania jest temperaturą tworzywa wytłaczanego, zmieniającą się nie tylko wzdłuż długości cylindra lub głowicy, ale również w danym przekroju poprzecznym kanału śrubowego i kanałów głowicy. Jest więc ona dość trudna do zmierzenia, gdyż część pomiarowa czujnika termometru elektrycznego ma określone rozmiary i musi się stykać z przepływającym i znajdującym się pod ciśnieniem tworzywem; jak się jednak okazuje, pomiar ten staje się często zbędny do osiągnięcia postawionego celu. Na ogół temperaturę cylindra stanowi temperatura mierzona w materiale cylindra w sąsiedztwie tworzywa, natomiast temperaturę głowicy — temperatura tworzywa przepływającego przy jednej ze ścianek głowicy (wówczas można jednocześnie mierzyć ciśnienie tworzywa) (rys. 5.21). Są to zatem pewne temperatury umowne.

Natężenie przepływu tworzywa podczas wytłaczania — wydajność wytłaczania — zależy od wielu czynników, ale największe znaczenie ma zależność od średnicy zewnętrznej ślimaka lub ślimaków i od ich prędkości obrotowej. Ze średnicą zewnętrzną ślimaka bądź ślimaków jest związana większość elementów geometrycznych układu uplastyczniającego wytłaczarek, natomiast prędkość obrotowa należy do podstawowych wielkości nastawianych na wytłaczarce. Rozwój konstrukcji układów uplastyczniających sprawia, że z upływem czasu rośnie wydajność (rys. 5.22) — intensywniej w latach 1970÷1980, a jej przyrosty są tym większe, im większa jest średnica ślimaka. Wydajność zależy także od rodzaju tworzywa wytłaczanego i od rodzaju otrzymywanej z niego wytłoczyny, np. dla ślimaka o średnicy 90 mm w przypadku wytłaczania z rozdmuchiwaniem folii PE-LD wynosi do 400÷450 kg/h,

Tablica 5.13

Warunki wytłaczania rur z niektórych tworzyw

Rodzaj tworzywa	Temperatura, °C					Ciśnienie MPa
	I	II	III	IV	V	
PE-LD	125	125	130	130	135	9÷15
PE-HD	140	160	165	165	170	10÷18
PVC twardy	155	165	175÷185	180	185	10÷20
PVC zmiękczony	175	165	150÷160	160	160	5÷12
PP	185	200	220÷230	230	240	15÷20
POM	170	190	205	200	200	5÷10
PCTFE	220	240	265÷290	270	250	15÷40
PUR	270	260	250÷260	270	280	15÷30

Uwaga: I — strefa zasilania, II — strefa przemiany, III — strefa dozowania, IV — korpus głowicy, V — dysza.

Tablica 5.14

Warunki wytłaczania płyt z niektórych tworzyw

Rodzaj tworzywa	Temperatura, °C							Ciśnienie MPa
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
PE-HD	225	195	165÷175	165	115	105	90	10÷18
PP	185	200	220÷230	230	125	110	90	15÷20
PS	170	180	195÷200	195	90	80	70	15÷25
PMMA	160	165	170	170	—	—	—	5÷10
PVC twardy	150	165	175÷190	180	100	95	85	10÷20

Uwaga: I — strefa zasilania, II — strefa przemiany, III — strefa dozowania, IV — głowica, V — walec skrajny wejściowy, VI — walec środkowy, VII — walec skrajny wyjściowy; tworzywo w postaci wstęgi po opuszczeniu głowicy jest wprowadzane między walec skrajny wejściowy i walec środkowy.

Tablica 5.15

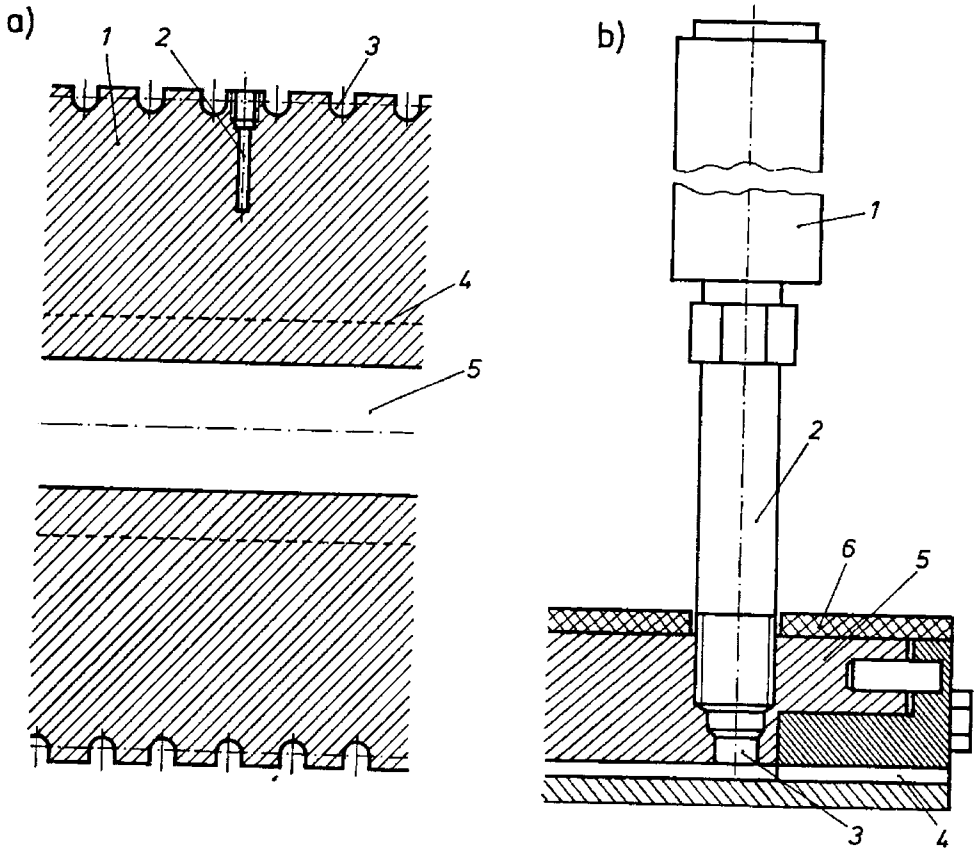
Warunki wytłaczania folii z niektórych tworzyw

Rodzaj tworzywa	Temperatura, °C				Ciśnienie MPa	Uwagi
	I	II	III	IV		
	Wytłaczanie folii płaskiej					
PE-LD	155	165	180÷195	200	15÷25	Temperatura walców
PP	190	220	245÷260	265	20÷32	chłodzących
CA	160	175	195÷200	200	15÷20	30÷50°C
	Wytłaczanie folii rurowej					
PE-LD	175	185	190÷200	200	—	Stopień rozdmuchania
PE-HD	140	150	160÷170	180	15÷20	2÷3

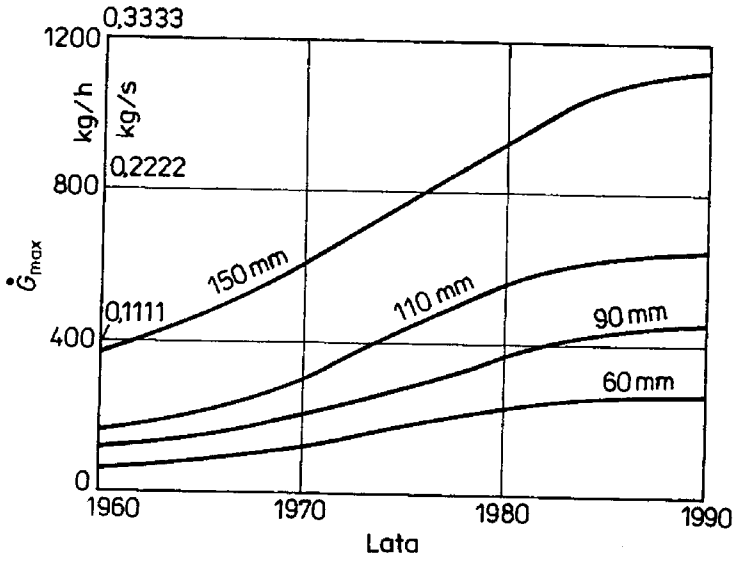
Uwaga: I — strefa zasilania, II — strefa przemiany, III — strefa dozowania, IV — korpus głowicy.

folii PE-HD — 450÷500 kg/h, a w przypadku wytłaczania płyt z PS wynosi do 650÷750 kg/h [5.32].

Optymalizację częściową procesu wytłaczania jednoślimakowego przeprowadza się tradycyjnie, biorąc za podstawę umowny syntetyczny wskaźnik charakteryzujący



Rys. 5.21. Pomiary temperatury podczas wytłaczania w przypadku: a) cylindra wytłaczarki dwuślimakowej stożkowej w przekroju przez płaszczyznę przenikania otworów na ślimaki; *1* — cylinder wytłaczarki, *2* — otwór do mocowania czujnika termometru termoelektrycznego, *3* — kanał śrubowy układu chłodzenia, *4* — zarys otworów osiowych cylindra (niewidocznych na rysunku), *5* — płaszczyzna przenikania, b) głowicy wytłaczarskiej do rur w tym samym przekroju; *1* — przetwornik czujnika, *2* — część trzpieniowa czujnika, *3* — część pomiarowa czujnika, *4* — kanał pierścieniowy dyszy głowicy, *5* — korpus dyszy, *6* — grzejniki elektryczne



Rys. 5.22. Największe masowe natężenie przepływu — największa wydajność masowa (orientacyjna) $\dot{G}_{max}$ podczas wytłaczania jednoślimakowego PE-LD w latach 1960÷1990 w przypadku ślimaków o różnych średnicach zewnętrznych (60÷150 mm) [5.26]

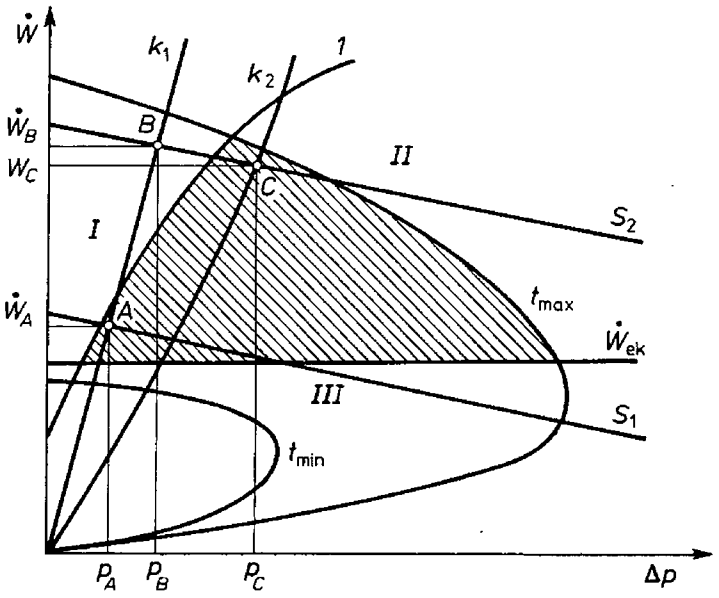
proces wytłaczania, zwany również *wskaźnikiem Schenkla* [5.103]. Wskaźnik ten wiąże ze sobą następujące wielkości: wytłoczoną ilość tworzywa W_0 w m^3, kryterium charakteryzujące ilościowo jakość wytłoczyny k_j w jednostce umownej q, równomierność procesu wytłaczania H_w w K · Pa, czas wytłaczania T w s oraz koszty wytłaczania K_w w zł. Przyjęto następującą postać wskaźnika

$$A = \frac{W_0 k_j H_w}{T K_w} \tag{5.24}$$

Iloraz W_0 i T stanowi objętościowe natężenie przepływu wytłoczyny $\dot{W}$ w m^3/s, zatem funkcja (5.24) przybiera postać

$$A = \frac{\dot{W} k_j H_w}{K_w} \tag{5.25}$$

Należy ustalić takie warunki wytłaczania, aby wielkość A przyjęła wartość optymalną. Jednocześnie należy dążyć do uzyskania jak największego natężenia przepływu (największej wydajności), co z jednej strony jest ograniczone minimalną jakością wytłoczyny, natomiast z drugiej — najwyższą temperaturą dopuszczalną tworzywa, której nie można przekroczyć.



Rys. 5.23. Wykres pracy wytłaczarki: S_1 — charakterystyka strefy dozowania przy obrotach ślimaka v_1, S_2 — przy obrotach v_2, przy czym $v_2 > v_1$, k_1 oraz k_2 — charakterystyki dyszy głowicy, *1* — krzywa jakości wytłoczyny, t_{max} oraz t_{min} — najwyższa i najniższa temperatura dopuszczalna tworzywa, $\dot{W}_{ek}$ — krzywa ekonomiczności wytłaczania, *I* — wytłoczyna o niedostatecznej jakości, np. niehomogeniczna, *II* — wytłoczyna przegrzana, *III* — natężenie przepływu nieekonomiczne, *A*, *B*, *C* — punkty pracy wytłaczarki

Analizę i interpretację w tym względzie przeprowadza się, jak dotychczas, z powodzeniem graficznie w układzie współrzędnych prostokątnych $\dot{W}$ oraz Δp, w którym przedstawiono charakterystykę procesu wytłaczania (rys. 3.3), uzyskując wykres pracy wytłaczarki. Na rysunku 5.23 przedstawiono typowy taki wykres. Pole zakreskowane na wykresie jest polem wytłaczania. Jest ono ograniczone następującymi krzywymi:

— *krzywą jakości wytłoczyny* (*1*), która dzieli całe pole na obszar niedostatecznej jakości — na lewo od krzywej, oraz na obszar zadowalającej jakości — na prawo od krzywej, przy czym jakość wytłoczyny najprościej określa się poprzez oznaczenie

stopnia jej homogeniczności, stosując np. jako materiał wejściowy w procesie wytłaczania tworzywo w postaci granulek i sproszkowany środek barwiący [5.35];

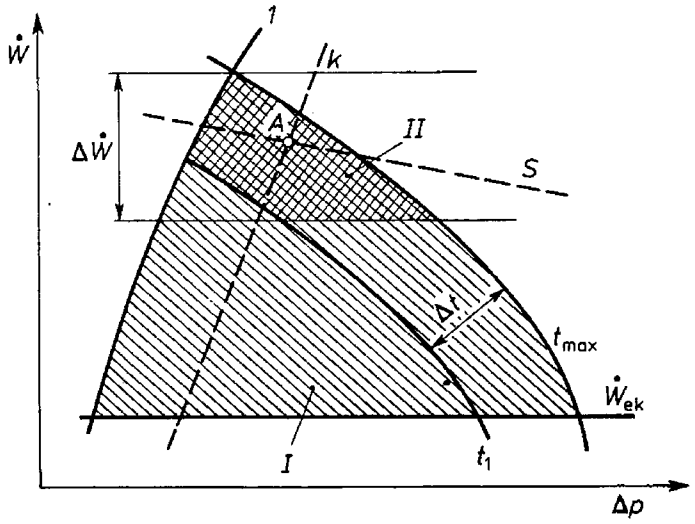
— *krzywą najwyższej temperatury dopuszczalnej* t_{max} tworzywa — w temperaturze wyższej tworzywo ulega degradacji; na wykresie zaznaczono również krzywą najniższej temperatury dopuszczalnej t_{min} — w temperaturze niższej tworzywo nie ulega żądanemu uplastycznieniu;

— *krzywą ekonomiczności wytłaczania* $\dot{W}_{ek}$ — uzyskiwanie mniejszego natężenia przepływu (wydajności) jest ekonomicznie uzasadnioną przyczyną wyboru innego typu wytłaczarki, ślimaka, głowicy itp.

Pokazany na rys. 5.23 punkt pracy wytłaczarki B, powstający jak wiadomo w miejscu przecięcia się charakterystyki strefy dozowania i charakterystyki dyszy głowicy wytłaczarskiej, znajduje się poza polem wytłaczania. Zmiana położenia punktu pracy z A do B nastąpiła wskutek wzrostu prędkości obrotowej ślimaka z wartości v_1 do wartości v_2. Tworzywo wytłaczane przy ciśnieniu p_B na końcu strefy dozowania, pomimo dużego natężenia przepływu $\dot{W}_B$, może mieć niedostateczną jakość. Prostym sposobem uzyskania wymaganej jakości, przy niezmiennej wartości v_2, jest podwyższenie ciśnienia z wartości p_B do wartości p_C, któremu odpowiada punkt pracy wytłaczarki C. Oznacza to zmianę charakterystyki dyszy głowicy z k_1 na k_2, co jest możliwe na przykład w przypadku zastosowania głowicy z regulowaną przewodnością przepływu. Ważne jest przy tym, aby na skutek wzrostu ciśnienia punkt pracy nie znalazł się poza najwyższą temperaturą dopuszczalną t_{max}.

Największe natężenie przepływu wytłoczyny, a zatem zmaksymalizowanie funkcji celu optymalizacji procesu wytłaczania, uzyskuje się, gdy punkt pracy wytłaczarki znajduje się jak najbliżej punktu przecięcia krzywej jakości wytłoczyny (*1*) i krzywej najwyższej temperatury dopuszczalnej t_{max} — punktem takim jest punkt A na rys. 5.24.

Zachowanie wymaganej równomierności procesu wytłaczania jest możliwe jedynie w przypadku odchylenia od temperatury t_{max} i odchylenia od natężenia przepływu wytłoczyny $\dot{W}$ (które jest m.in. funkcją ciśnienia na końcu strefy dozowania)

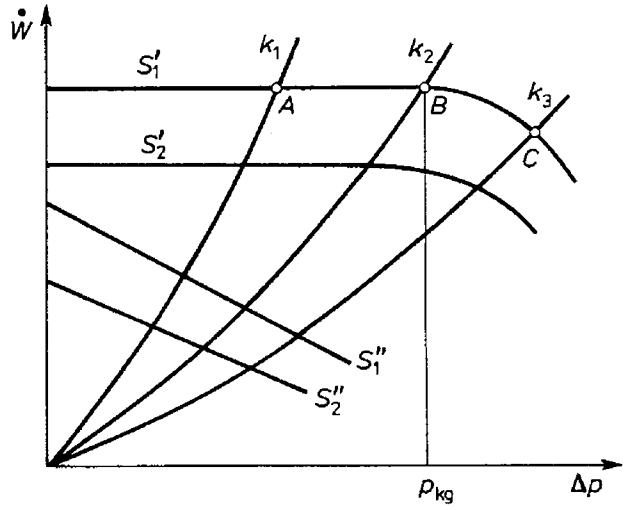


Rys. 5.24. Optymalizacja pola wytłaczania: Δt — dopuszczalne odchylenie najwyższej temperatury tworzywa, $\Delta\dot{W}$ — dopuszczalne odchylenie natężenia przepływu wytłoczyny, *I* — pole wytłaczania, *II* — optymalne pole wytłaczania; pozostałe oznaczenie jak w podpisie pod rys. 5.23

odpowiadającego punktowi przecięcia się krzywej (*1*) i krzywej t_{max} w określonych dopuszczalnych granicach wyznaczonych przez amplitudy fluktuacji temperatury i pulsacji natężenia przepływu. Dopuszczalne odchylenie temperatury oznaczono Δt, a natężenia przepływu — $\Delta \dot{W}$ i naniesiono na rys. 5.24. W ten sposób otrzymano optymalne pole wytłaczania, które jest zawsze częścią całego pola wytłaczania. Optymalne pole ograniczone jest poprzez: krzywą jakości wytłoczyny (*1*) i krzywą najwyższej temperatury dopuszczalnej t_{max} oraz dopuszczalnym odchyleniem tej temperatury Δt i dopuszczalnym odchyleniem natężenia przepływu $\Delta \dot{W}$ [5.51].

Proces wytłaczania przebiegający w warunkach zapewniających optymalne pole wytłaczania odbywa się przy zbliżonym do największego z możliwych natężeniu przepływu wytłoczyny, odpowiedniej jej jakości i przy znacznej równomierności procesu, czyli przy małej fluktuacji temperatury, małej pulsacji natężenia przepływu i związanej z tym małej pulsacji ciśnienia.

W przypadku wytłaczania za pomocą wytłaczarki z rowkowaną strefą cylindra wykresy pokazane na rys. 5.23 i 5.24 mają nieco inne przebiegi. Do określonej granicznej wartości ciśnienia tworzywa p_{kg} (oznaczenie zgodne z podanym w rozdz. 3, p. 3.1.1) charakterystykę strefy dozowania przy ślimaku S_1 o obrotach n_1 tworzy prosta pozioma, czyli $\dot{W} = \text{const}$, a po jej przekroczeniu załamuje się (rys. 5.25). Charakterys-



Rys. 5.25. Charakterystyka procesu wytłaczania za pomocą wytłaczarki z rowkowaną strefą cylindra w porównaniu z charakterystyką w przypadku braku rowków; oznaczenia w tekście

tyka dyszy głowicy powinna być tak dobrana, aby punkt pracy znajdował się na odciętej zgodnej z p_{kg}; takim punktem jest punkt *B* leżący na charakterystyce dyszy k_2. W punkcie pracy *B* zachodzi stosunkowo małe jednostkowe zużycie energii w procesie wytłaczania, co jest ważne, gdyż — jak wiadomo — układy z rowkowaną strefą cylindra odznaczają się mniejszą sprawnością energetyczną. W punkcie pracy *A* leżącym na charakterystyce dyszy k_1 nie osiąga się żądanego ciśnienia tworzywa, natomiast w punkcie pracy *C* leżącym na charakterystyce dyszy k_3 nie tylko nie jest utrzymany kierunek ruchu tworzywa zgodny z kierunkiem rowków, ale również powiększeniu ulega jednostkowe zużycie energii — procesu wytłaczania nie powinno się w takich warunkach prowadzić. Na rysunku 5.24 pokazano także charakterystykę

strefy dozowania przy ślimaku S_2' o obrotach v_2' ($v_2' < v_1'$) oraz charakterystykę strefy dozowania bez rowków przy ślimakach S_1'' i S_2''.

Funkcją celu optymalizacji może być wydajność procesu wytłaczania; procedury optymalizacyjne są opisane w literaturze [5.117].

5.3.4. Warunki wtryskiwania

Ze względu na cykliczność, złożoną kinematykę i dynamikę, a także szczególnie dużą różnorodność odmian wtryskiwania, dobór poprawnych jego warunków jest skomplikowany, a znalezienie warunków optymalnych nie jest zagadnieniem rozwiązanym w sposób zadowalający. Spośród kilkudziesięciu warunków wtryskiwania istotne znaczenie, ze względu na jakość wyprasek, wydajność procesu i jego energochłonność, mają:

a) *temperatura*: poszczególnych stref grzejnych cylindra, tworzywa przepływającego przez dyszę wtryskową, zespołu ruchomego formy, zespołu nieruchomego formy;

b) *ciśnienie i siła*: ciśnienie wtryskiwania, ciśnienie docisku, siła zamknięcia formy;

c) *prędkość i droga*: prędkość ruchu obrotowego ślimaka, prędkość ruchu postępowego i zwrotnego układu uplastyczniającego, jak również ślimaka lub tłoka, droga przesuwania układu uplastyczniającego, skok ślimaka lub tłoka;

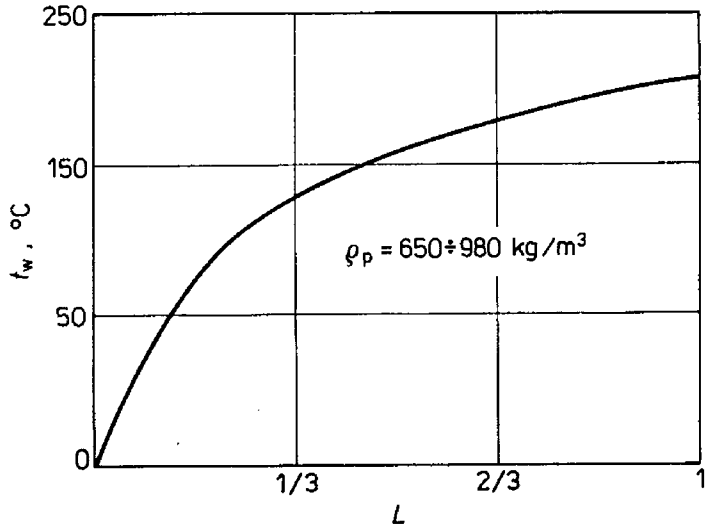
d) *czas*: cyklu wtryskiwania, poszczególnych jego faz, zwłaszcza fazy wtrysku i docisku, moment przejścia ciśnienia wtryskiwania w ciśnienie docisku, czas ochładzania wypraski w formie.

Na ogół należy ustalić takie warunki wtryskiwania, aby uzyskać wypraski o odpowiedniej jakości przy jak największej wydajności i jak najmniejszej energochłonności. Wymienione warunki ustala się na podstawie danych, które mają różny stopień szczegółowości; od danych orientacyjnych do bardziej szczegółowych, ujmowanych w formie zestawień tabelarycznych bądź wykresów. W tablicy 5.16 zestawiono orientacyjne wartości temperatury cylindra, temperatury form i ciśnienia wtryskiwania niektórych tworzyw. Dysponuje się również zestawieniami tabelarycznymi bardziej szczegółowymi, które zazwyczaj są opracowywane przez producentów danych tworzyw. Na przykład w firmie Bakelite Kunststoffe (Niemcy) opracowano dość dokładne warunki wtryskiwania i prasowania licznych odmian tworzyw fenolowych produkowanych przez tę firmę [5.33]. Podobnie w Polsce w Zakładach Tworzyw Sztucznych w Pustkowie opracowano warunki wtryskiwania i prasowania tworzyw fenolowych produkowanych przez te Zakłady (tabl. 5.17). Jeżeli chodzi o wykresy, to są to zazwyczaj krzywe rozkładu temperatury cylindra wzdłuż jego długości i temperatury dyszy wtryskowej, na przykład takie, jakie dla 10 wybranych tworzyw termoplastycznych i wtryskiwania wyprasek litych przedstawił na podstawie literatury A. Smorawiński [5.116]. Na rysunku 5.26 pokazano przykładowo krzywą rozkładu temperatury podczas wtryskiwania porującego PS.

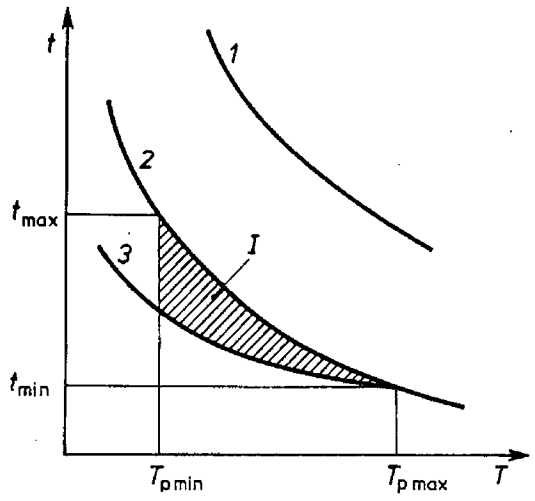
Przy wyborze warunków wtryskiwania ważną rzeczą jest określenie czasu przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym wtryskarki. Czas ten T_p jest wprost proporcjonalny do iloczynu masy M tworzywa w układzie i czasu T_w cyklu wtryskiwania, a odwrotnie proporcjonalny do masy m tworzywa wtryskiwanego podczas cyklu

$$T_p = \frac{M T_w}{m} \tag{5.26}$$

Minimalny czas przebywania tworzywa w układzie $T_{p\min}$, wynikający z konieczności właściwego uplastycznienia tworzywa, zależy głównie od właściwości cieplnych i reologicznych tworzywa, temperatury, do której należy tworzywo nagrzać, konstrukcji układu i innych czynników. Z kolei maksymalny czas przebywania jest ograniczony możliwością rozkładu cieplnego tworzywa, którego objawy występują nawet wówczas, gdy temperatura tworzywa jest niższa od temperatury rozkładu, i rosną z upływem czasu. Zależności tego typu pokazano w układzie współrzędnych prostokątnych: czas T — temperatura t na rys. 5.27. Przedstawiono na nim trzy krzywe: krzywą rozkładu tworzywa (*1*), degradacji tworzywa (*2*) i uplastycznienia tworzywa (*3*). Wszystkie one mają podobny przebieg; w warunkach powyżej krzywych następuje odpowiednio: destrukcja tworzywa, degradacja i zadowalające uplastycznienie, natomiast w warunkach poniżej krzywych odpowiednio: nie ma destrukcji, degradacji i potrzebnego stopnia uplastycznienia tworzywa.



Rys. 5.26. Zalecany przebieg temperatury t_w cylindra o długości L przy wtryskiwaniu porującym PS; ilość poroforu 0,5÷3% mas. w stosunku do polimeru [5.136]



Rys. 5.27. Krzywe charakteryzujące procesy cieplne zachodzące w czasie w układzie uplastyczniającym wtryskarki; oznaczenia w tekście

Tablica 5.16

Wartości temperatury i ciśnienia podczas wtryskiwania niektórych tworzyw

Rodzaj tworzywa	Temperatura, °C		Ciśnienie wtryskiwania MPa
	cylindra	formy	
Polietylen małej gęstości	160÷300	25÷50	50÷70
Polietylen dużej gęstości	180÷300	50÷80	60÷90
Polipropylen	200÷300	20÷50	80÷120
Poliizobutylen	140÷180	20÷80	60÷140
Kopolimer propylenu z etylenem	260÷300	20÷50	100÷120
Polistyren	160÷260	30÷65	80÷140
Polistyren wysokoudarowy	200÷260	40÷60	100÷130
Kopolimer SAN	180÷270	65÷75	100÷150
Terpolimer ABS	220÷275	40÷95	70÷180
Polichlorek winylu zmiękczony	150÷200	40÷60	40÷100
Polichlorek winylu twardy	150÷185	40÷60	100÷150
Politrifluorochloroetylen	150÷285	80÷130	150÷300
Poliformaldehyd	180÷240	70÷140	80÷150
Politlenek fenylenu	290÷340	120÷150	120÷140
Tworzywa fenolowe	55÷85	155÷190	80÷150
Polimetakrylan metylu	160÷250	60÷90	80÷200
Politereftalan etylenowy	225÷270	25÷130	100÷150
Poliwęglan	270÷315	85÷120	80÷200
Tworzywa mocznikowe	50÷70	150÷160	90÷150
Poliamid	230÷270	60÷120	80÷150
Poliuretan	180÷220	40÷100	70÷100
Guma z kauczuku naturalnego	50÷70	170	120
Guma z kauczuku chloroprenowego	55÷70	175	120
Polisulfon	340÷400	90÷160	165
Octan celulozy	160÷260	40÷70	80÷130

Tablica 5.17

Warunki wtryskiwania tworzyw fenolowych typu Polofen [5.119]

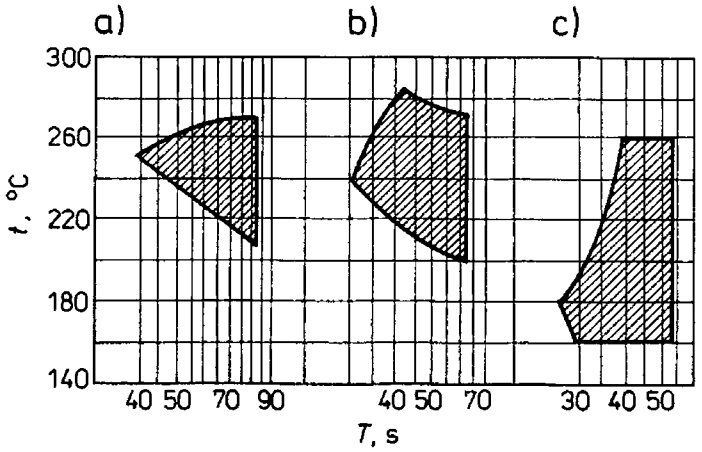
Odmiana tworzywa — — nazwa handlowa	Temperatura, °C		Ciśnienie wtryskiwania MPa
	cylindra	formy	
Polofen FE18-1	55÷75	166÷165	98÷147
Polofen FF-1	55÷70	155÷165	118
Polofen U-5	55÷75	155÷165	98÷147
Polofen M	55÷75	155÷165	118
Polofen F-1	60÷80	150÷160	147
Polofen N	55÷75	155÷165	98÷147
Polofen P-1 i P-2	55÷75	155÷165	98÷147
Polofen WK	60÷80	150÷160	98÷147
Polofen FE24-4	60÷80	150÷160	98÷147
Polofen FE18-1 WH	55÷75	155÷165	98÷147
Polofen FE-1 WH	55÷70	166÷165	118

Uwaga: Charakterystyka poszczególnych odmian tworzywa jest podana w PN-81/C-89270, temperatura dyszy wtryskowej 80÷100°C, czas cyklu wtryskiwania 30÷60 s na 1 mm grubości ścianki wypraski.

Intensywność zmiany wartości funkcji $t = f(T)$ świadczy o termostabilności tworzywa. Duża intensywność, wyrażająca się na ogół stromym przebiegiem krzywych, świadczy o znacznej termostabilności, natomiast mała intensywność, przejawiająca się spłaszczeniem krzywych, jest świadectwem małej termostabilności.

Punkt przecięcia się krzywej degradacji i krzywej uplastycznienia wyznacza *maksymalny czas przebywania tworzywa w układzie* $T_{p\max}$ oraz najniższą temperaturę dopuszczalną tworzywa $t_{\min}$. Określając minimalny czas przebywania tworzywa w układzie $T_{p\min}$, można dalej wyznaczyć najwyższą temperaturę dopuszczalną tworzywa $t_{\max}$. Pole zakreskowane na wykresie jest polem wtryskiwania. Jest ono ograniczone krzywą degradacji, krzywą uplastycznienia i minimalnym czasem przebywania tworzywa w układzie uplastyczniającym wtryskarki. Wypraski otrzymane w procesie wtryskiwania, przebiegającym w warunkach zapewniających temperaturę tworzywa i czas jego przebywania w układzie uplastyczniającym mieszczące się w polu wtryskiwania, mają zadowalającą jakość, oczywiście przy spełnieniu innych warunków (w tym przypadku drogorzędnych) wpływających na jakość, np. poprawnej konstrukcji formy wtryskowej.

Istotny jest związek pomiędzy temperaturą wtryskiwania i czasem cyklu, który podaje się najczęściej graficznie w postaci pola zdolności do wtryskiwania, które pokazano na rys. 5.28. Linia górna pola wskazuje najwyższą temperaturę dopuszczalną, powyżej której następują objawy degradacji tworzywa, linia dolna natomiast określa najniższą temperaturę dopuszczalną, poniżej której występuje niedostateczne uplastycznienie. Z rozległości i kształtu pola można wnioskować o wtryskiwalności danego tworzywa. Z przykładu rysunkowego wynika, że najlepszą wtryskiwalnością odznacza się PE-LD.

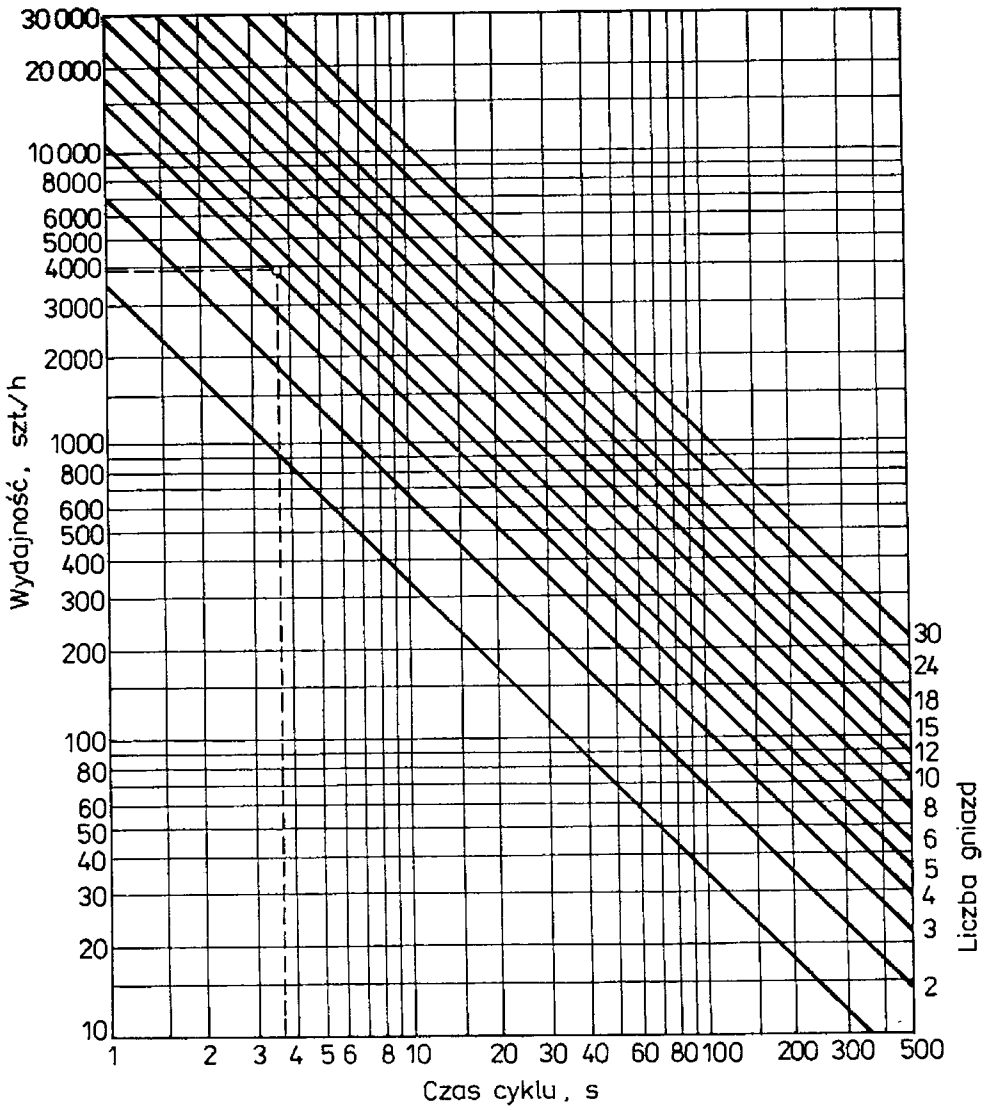


Rys. 5.28. Pole zdolności do wtryskiwania: a) PS-HI, b) PP, c) PE-LD

Istotnym zagadnieniem jest również zależność między wydajnością procesu wtryskiwania, wyrażoną liczbą N wyprasek w danym czasie T_p, liczbą i gniazd w formie wtryskowej oraz czasem T_w cyklu wtryskiwania

$$i = \frac{N T_w}{T_p k_w} \tag{5.27}$$

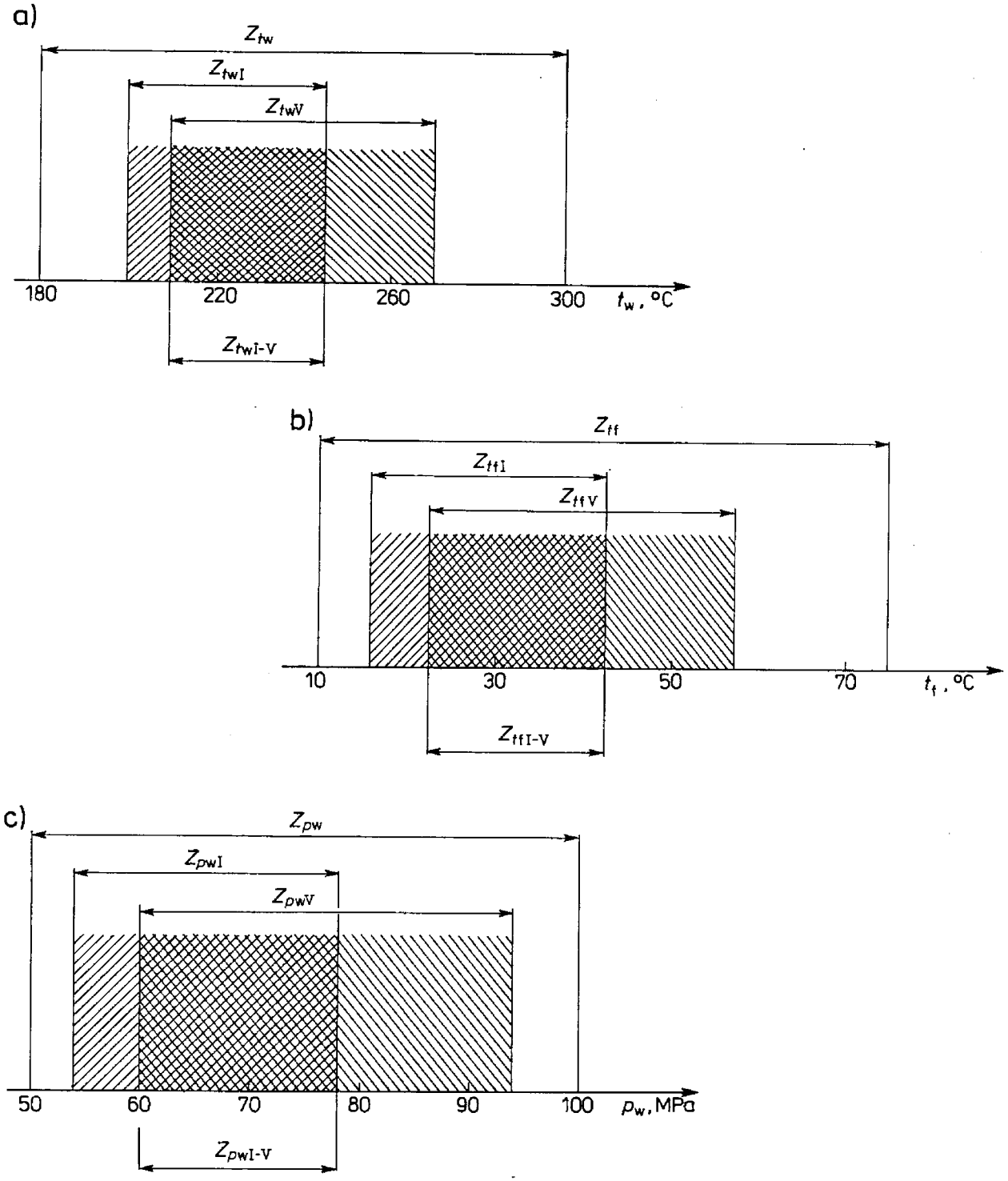
gdzie k_w oznacza współczynnik wykorzystania wtryskarki uwzględniający czas potrzebny na obsługę wtryskarki i potrzeby naturalne ($k_w = 0{,}6 \div 0{,}8$). Można także posługiwać się nomogramem przedstawionym na rys. 5.29. W dokładnych ustaleniach



Rys. 5.29. Orientacyjna zależność między wydajnością procesu wtryskiwania, liczbą gniazd formy i czasem cyklu wtryskiwania; linie przerywane dotyczą przykładu, gdy należy wyznaczyć liczbę gniazd formy w przypadku żądanej wydajności procesu wtryskiwania 3900 szt./h i czasu cyklu wtryskiwania wynoszącego 3,7 s — szukana liczba gniazd formy wynosi 4 [5.134]

bierze się pod uwagę więcej czynników, między innymi wyróżnia się liczbę gniazd: niezbędną do uzyskania żądanej liczby wyprasek, opłacalną ekonomicznie, uzasadnioną technicznie i określoną możliwościami wtryskarki [5.139].

Podczas wtryskiwania dokładnościowego stosuje się — jak już podano — zawężone zakresy parametrów wtryskiwania. W przypadku form jednogniazdowych lub wielogniazdowych o identycznych geometrycznie gałęziach układu przepływowego tworzywa, dobór warunków wtryskiwania odbywa się zgodnie z już podanymi wiadomościami. W przypadku natomiast, gdy forma wielogniazdowa ma kanały o różnej długości, jak to przykładowo pokazano na rys. 3.56a i 5.15, zawężenie parametrów wtryskiwania jest inne dla każdego gniazda i inne dla formy. Parametry formy są oczywiście parametrami nastawianymi. Zakres parametrów wtryskiwania dla formy określa się przez koniunkcję, co w podanym przykładzie, w odniesieniu do danej temperatury wtryskiwania, temperatury formy i ciśnienia wtryskiwania, jest przedstawione na rys. 5.30.

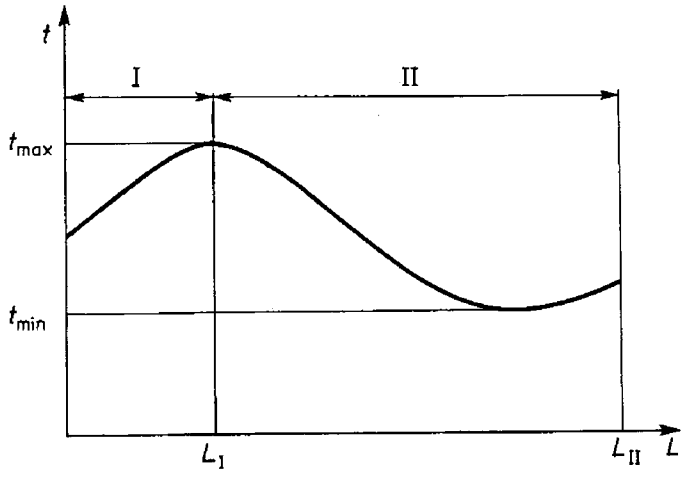


Rys. 5.30. Zasada doboru parametrów precyzyjnego wtryskiwania dwudziestogniazdowego tłoczysk strzykawek lekarskich jednorazowego użytku z PE-HD: a) temperatury wtryskiwania t_w, b) temperatury formy t_f, c) ciśnienia wtryskiwania p_w; Z_{tw}, Z_{tf}, Z_{pw} — zakresy zalecanych ogólnie wartości t_w, t_f oraz p_w, Z_{twI}, Z_{tfI}, Z_{pwI} — zakresy wartości t_w, t_f oraz p_w dla gniazda I z najkrótszą drogą przepływu, Z_{twV}, Z_{tfV}, Z_{pwV} — zakresy wartości t_w, t_f oraz p_w dla gniazda V z najdłuższą drogą przepływu, $Z_{twI\text{-}V}$, $Z_{tfI\text{-}V}$, $Z_{pwI\text{-}V}$ — zakresy t_w, t_f oraz p_w dla formy [5.110]

Optymalizacja procesu wtryskiwania budzi od dawna duże zainteresowanie i poświęcona jej jest dość bogata literatura, również w języku polskim [5.115, 5.116].

Dominuje kierunek działań optymalizacyjnych na podstawie cieplnego równania stanu tworzywa wtryskiwanego, ujętego w przedstawiony już wykres $p-v-t$, zwanych krótko *optymalizacją* $p-v-t$. Funkcją celu optymalizacji $p-v-t$ jest często jakość

wyprasek, określana **według kryterium** [5.52] *masy wyprasek pochodzących z tego samego gniazda*, której wartość nominalna powinna być maksymalizowana, a jednokierunkowa odchyłka mała, oraz wymiary wyprasek, które powinny mieścić się w przyjętych tolerancjach. Osiąga się to przez taką regulację czasu docisku i czasu ochładzania, głównie w zależności od temperatury tworzywa i temperatury obu podzespołów formy wtryskowej, że na wykresie $p-v-t$ izobara 0,1 MPa jest zawsze osiągana niemal w tym samym punkcie (rys. 3.64). Zaznaczyć trzeba, że nie oddziałuje się na ciśnienie docisku, gdyż mogłoby to powodować wzrost naprężeń własnych wyprasek. Optymalizację $p-v-t$ stosuje się również w odniesieniu do ciśnienia hydraulicznego docisku i do ciśnienia w gnieździe formy w fazie docisku [5.44], traktowanych jako pośrednie kryteria jakości wyprasek. Optymalizację tę praktycznie



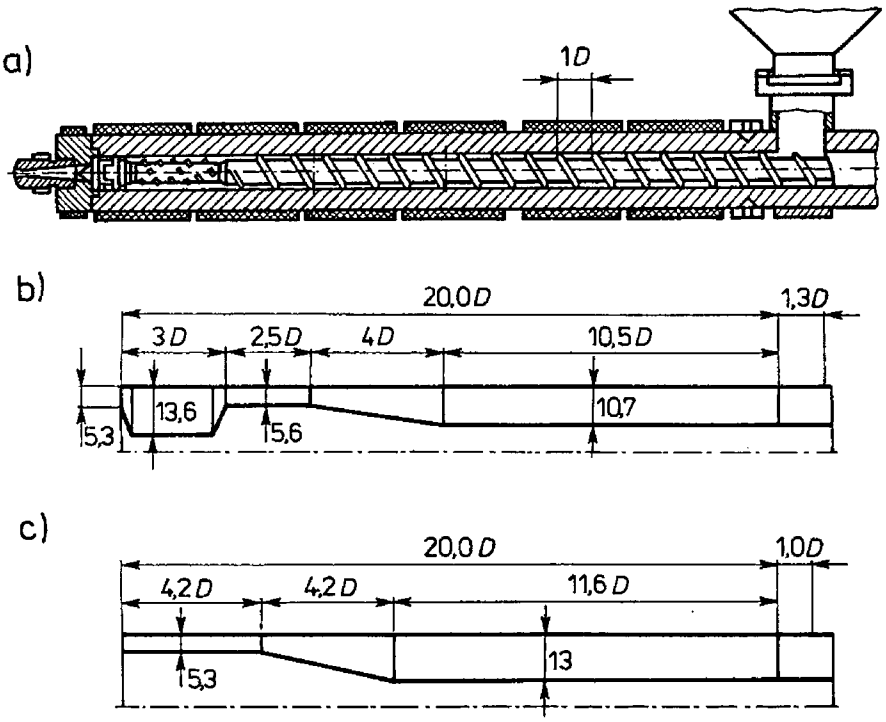
Rys. 5.31. Schemat rozkładu osiowego temperatury t tworzywa wtryskiwanego, znajdującego się w cylindrze między dyszą wtryskową i tylnym położeniem czoła ślimaka: t_{min} i t_{max} — temperatura odpowiednio najniższa i najwyższa, L_I — długość obszaru I (od strony dyszy), L_{II} — długość obszaru II (od strony czoła ślimaka)

przeprowadza się stosując układy mikroprocesorowe, np. Unilog 8000 lub Unilog 9000 [5.52].

Innym kierunkiem jest optymalizacja, w której funkcją celu jest jakość wyprasek, określana pośrednio przez zwiększenie stopnia stabilizacji rozkładu temperatury w kierunku osiowym, tworzywa wtryskiwanego, znajdującego się w cylindrze układu uplastyczniającego między dyszą wtryskową i tylnym położeniem czoła ślimaka. Otóż okazuje się, że proces uplastyczniania i kinematyka ślimaka powodują nieuchronne podwyższanie temperatury w obszarze I — od strony dyszy wtryskowej, i spadek temperatury, a następnie jej nieznaczny wzrost w obszarze II — od strony czoła ślimaka (rys. 5.31). Istotą tej optymalizacji, zwanej też krótko *optymalizacją CT**), jest oddziaływanie na rozkład osiowy temperatury tworzywa, w zakresie minimalizowania różnic temperatury, poprzez regulację prędkości obrotowej ślimaka i przeciwciśnienia. W miarę odsuwania się ślimaka zmniejsza się jego prędkość obrotowa, a wzrasta przeciwciśnienie. Optymalizację tę stosują m.in. firmy Toshiba Machine Company (Japonia) i Battenfeld (Niemcy).

Jakość wyprasek można również określić pośrednio przez zwiększenie stopnia stabilności rozkładu temperatury tworzywa w kierunku promieniowym, w określ-

*) Skrót wywodzi się od pierwszych liter słów constans oraz temperatura.



Rys. 5.32. Układ uplastyczniający wtryskarki firmy Battenfeld: a) przekrój wzdłużny układu, b) rozwinięcie kanału śrubowego ślimaka niekonwencjonalnego, c) rozwinięcie kanału śrubowego ślimaka tradycyjnego (dla porównania)

lonym przekroju poprzecznym cylindra, między dyszą wtryskową a tylnym położeniem czoła ślimaka. Ma to ścisły związek z nieuniknioną fluktuacją krótko- i długookresową temperatury (rozdz. 1, p. 1.8). Optymalizacja, której istotą jest minimalizowanie różnic temperatury w rozkładzie promieniowym, polega głównie na zmianach konstrukcyjnych układu uplastyczniającego. Na przykład [5.52] można stosować ślimak o długości $20D$ z następującymi strefami geometrycznymi: zasilania ($10{,}5D$), sprężenia ($4D$), ścinania ($2{,}5D$) i mieszania ($3D$). Trzy pierwsze strefy mają ciągły kanał śrubowy, a strefa ostatnia — nieciągły (rys. 5.32). Można również wydłużyć otwór wlotowy tworzywa w cylindrze do $1{,}3D$ (rys. 5.32b). Stosując przedstawiony układ uplastyczniający zaleca się degresywny (odwrotny do tradycyjnego — progresywnego) rozkład temperatury wzdłuż długości układu — najwyższą temperaturę w strefie zasilania, a najniższą w strefie mieszania. Wszystko to ma powodować nie tylko istotne zmniejszenie różnic temperatury w rozkładzie promieniowym, ale i wiele innych korzystnych skutków.

5.3.5. Warunki prasowania

Podstawowymi warunkami prasowania są przede wszystkim: ciśnienie, temperatura i czas prasowania. Tradycyjny sposób ich wyznaczania będzie przedstawiony na przykładzie prasowania tłocznego tworzyw aminowych [5.135]. W zależności od długości drogi przepływu tłoczywa w gnieździe formującym, będącej bezpośrednią funkcją wysokości wypraski, wyznacza się ciśnienie podstawowe p_0 (rys. 5.33), które następnie koryguje się w zależności od takich czynników, jak:

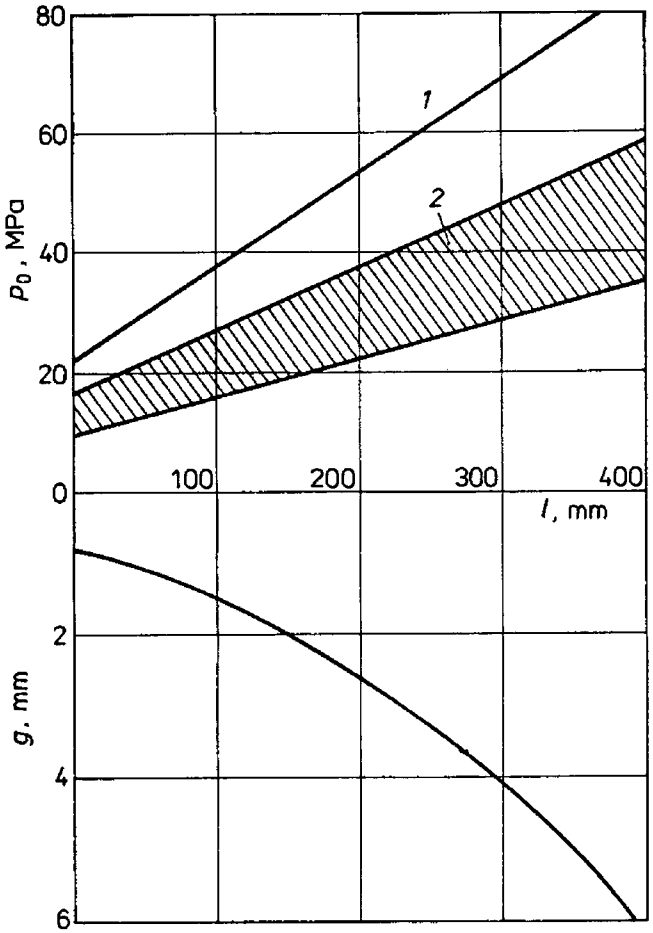
— grubość ścianki wypraski; znając zależność grubości ścianki od długości drogi przepływu tworzywa (rys. 5.33), wprowadza się współczynnik poprawkowy a (tabl. 5.18);

— kształt wypraski; w zależności od kształtu wypraski wprowadza się współczynnik poprawkowy b — dla wypraski □ $b = 1{,}2$, dla ⌣ $b = 1$, a dla ∪ $b = 0{,}8$;

— chropowatość powierzchni gniazda formy; w zależności od chropowatości wprowadza się współczynnik poprawkowy c — dla powierzchni bardzo gładkiej $c = 0{,}9$, gładkiej $c = 1$, mniej gładkiej $c = 1{,}1$.

Rzeczywiste ciśnienie prasowania p_{rz} (rozdz. 3, p. 3.3.2) wynosi

$$p_{rz} = a\ b\ c\ p_0 \tag{5.28}$$



Rys. 5.33. Współzależność długości l drogi przepływu tworzywa w gnieździe formującym, ciśnienia podstawowego p_0 prasowania tłocznego oraz grubości g ścianki wypraski z tworzyw aminowych: *1* — bez podgrzewania, *2* — z podgrzewaniem

Tablica 5.18
Wartości współczynnika poprawkowego a w zależności od odchylenia od zalecanej grubości ścianki wypraski (rys. 5.33)

Odchylenie, mm	Wartość a
−3	1,6
−2	1,4
−1	1,2
0	1,0
+1	0,9
+2	0,8
+3	0,7

Na przykład prasowanie tłoczne bez podgrzewania wyprasek o wysokości 200 mm, grubości ścianki 2 mm, kształtu ⌴ przy bardzo gładkiej powierzchni gniazda wymaga ciśnienia rzeczywistego

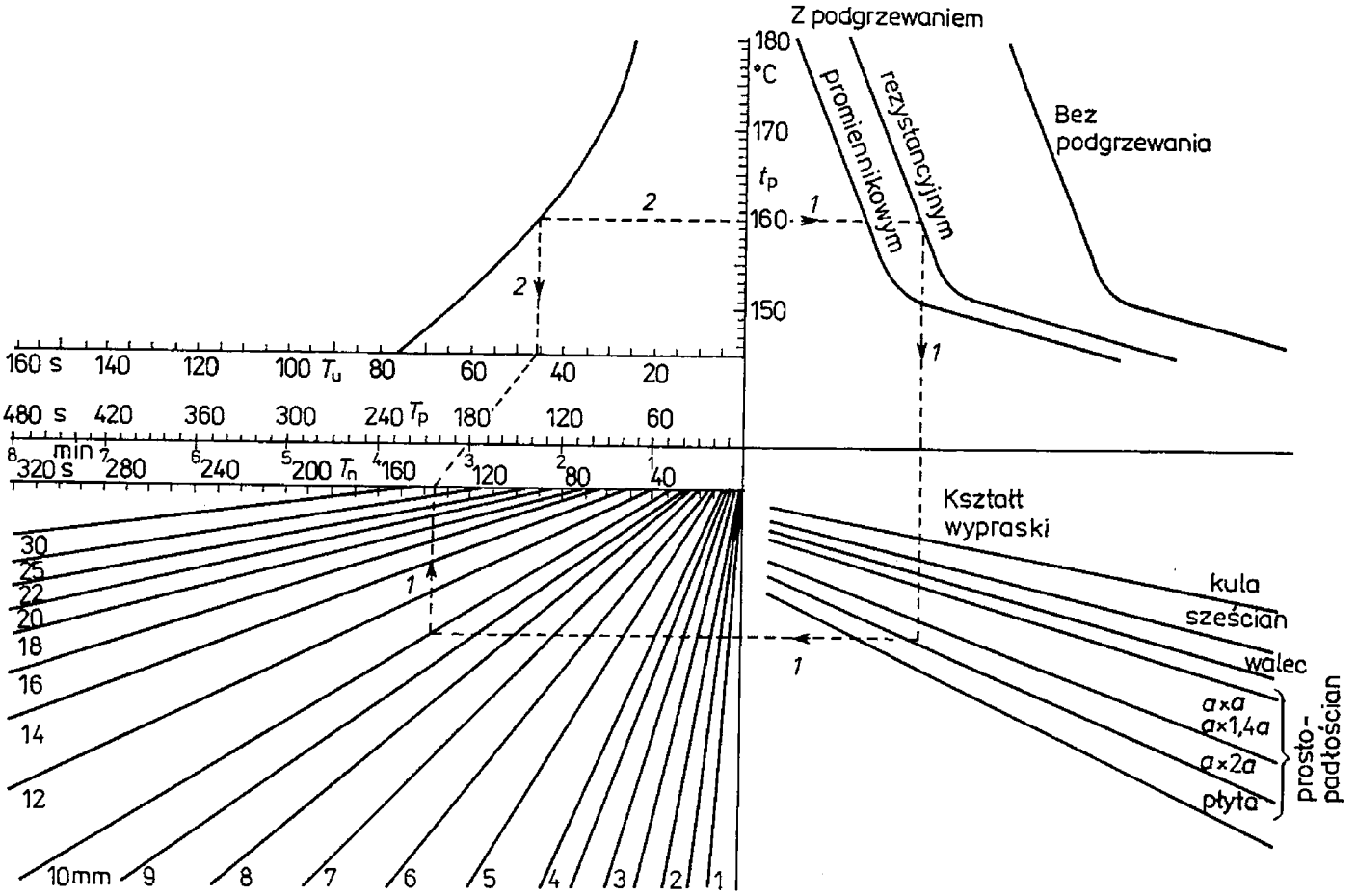
$$p_{rz} = 54 \cdot 1{,}1 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}9 = 64 \text{ MPa}$$

Warunki prasowania tłocznego i przetłocznego są od dłuższego czasu stabelaryzowane, ale na ogół zestawienia tabelaryczne mają charakter orientacyjny i w małym stopniu uwzględniają wymienione czynniki. Tablice znajdują się w łatwo dostępnej literaturze [5.7, 5.70, 5.91].

Wygodne w użyciu i dostatecznie dokładne są nomogramy, spośród których na wyróżnienie zasługują nomogramy opracowane przez H. Tautza w VEB Presswerk Ottendorf-Okrilla (Niemcy) [5.127]. Sporządzono je na podstawie wyników badań prowadzonych za pomocą plastografometru Kanawca. Przyjęto, że czas prasowania tłocznego T_p składa się z czasu nagrzewania T_n i czasu utwardzania T_u

$$T_p = T_n + T_u \tag{5.29}$$

Jeden z takich nomogramów, w wersji uproszczonej, przedstawiono na rys. 5.34. Nomogram jest oparty na układzie współrzędnych prostokątnych, a jego budowa wynika z rysunku.



Rys. 5.34. Nomogram (wersja uproszczona) zależności czasów nagrzewania T_n, utwardzania T_u i prasowania T_p ($T_p = T_n + T_u$) tłoczyw fenolowych oznaczonych symbolami 31/1649, 31/1649SE, 31.5/1749, od warunków prasowania tłocznego; podgrzewanie bezpośrednie pojemnościowe do temperatury 90°C, podgrzewanie pośrednie rezystancyjne do temperatury 80°C [5.127]

Przykład korzystania z nomogramu

Wyznaczyć czasy nagrzewania T_n, utwardzania T_u i prasowania T_p podczas procesu prasowania tłocznego tłoczywa fenolowego, podgrzewanego pojemnościowo, przy temperaturze prasowania $t_p = 160°C$; wypraska ma w przekroju poprzecznym kształt prostopadłościanu o wymiarach 6,7 × 13,4 mm.

Na osi pionowej nomogramu (rys. 5.34) odszukuje się temperaturę prasowania $t_p = 160°C$ i z tego punktu prowadzi w prawo prostą poziomą do przecięcia z odpowiednią krzywą podgrzewania (linia *1*), skąd prostą pionową w dół, przez oś

poziomą, do przecięcia z odpowiednią prostą kształtu wypraski. Następnie prowadzi się prostą poziomą do przecięcia z prostą charakteryzującą odpowiednią grubość wypraski wynoszącą $(6{,}7+13{,}4)/2 = 10$ mm i dalej prostą pionową do przecięcia z osią T_n, gdzie odczytuje się $T_n = 136$ s. Z kolei z tego samego punktu na osi t_p prowadzi się w lewo prostą poziomą do przecięcia z krzywą (linia *2*) i z tego punktu prostą pionową do przecięcia z osią T_u. Na skali tej osi odczytuje się $T_u = 46$ s. Aby określić czas prasowania, należy połączyć prostą punkty $T_n = 136$ s i $T_u = 46$ s oraz następnie odczytać na skali osi T_p miejsce przecięcia; wartość T_p wynosi 181 s. Czas prasowania można również określić ze wzoru (5.29), a zatem $T_p = 136 + 46 = 182$ s. Różnica wartości czasu prasowania 1 s wynika z dokładności odczytywania wartości liczbowych z nomogramu i należy ją ocenić jako bardzo małą.

5.4. Zagadnienia ogólne procesów technologicznych

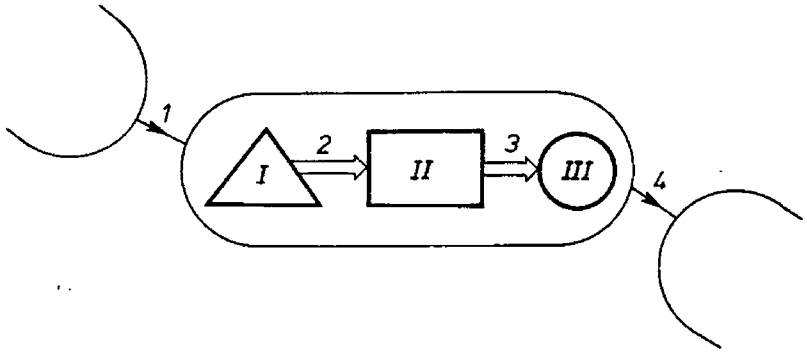
Proces technologiczny wytwarzania wytworu lub przetworu z tworzywa obejmuje *proces przetwórstwa* i *procesy uzupełniające*. W procesie przetwórstwa zachodzą złożone zjawiska fizyczne i chemiczne oraz zmiany geometryczne tworzywa przetwarzanego, które mają bardzo istotny wpływ na wartość użytkową otrzymanego wytworu lub przetworu, natomiast w procesach uzupełniających zachodzą przemiany i zmiany tworzywa wejściowego i wyjściowego ważne w stosunku do całego procesu technologicznego, ale nie mające tak podstawowego znaczenia.

Trzeba dodać, że niektóre procesy uzupełniające stanowią w swej istocie procesy przetwórstwa. Z tego powodu rozpatrując procesy technologiczne często wyróżnia się *procesy przetwórstwa podstawowe* i *procesy przetwórstwa uzupełniające*. Pierwsze z nich przeprowadza się za pomocą maszyn i narzędzi przetwórczych, natomiast drugie za pomocą urządzeń uzupełniających. W urządzeniach uzupełniających przebiegają również inne procesy.

Biorąc pod uwagę przebieg procesu technologicznego, procesy uzupełniające dzieli się na *proces przygotowawczy I* i *proces zakończeniowy III* (rys. 5.35). Do procesu przygotowawczego, przebiegającego w urządzeniach uzupełniających przygotowawczych, zalicza się np. suszenie i mieszanie tworzywa wejściowego, a do procesu zakończeniowego, przebiegającego w urządzeniach uzupełniających zakończeniowych, zalicza się np. ochładzanie tworzywa wyjściowego, jego rozdzielanie, zwijanie, zliczanie, układanie. Procesy technologiczne zachodzą na ogół na drodze od kilku do 40, a nawet więcej metrów, natomiast ilość tworzywa przetwarzanego dochodzi do kilkuset, a nawet kilku tysięcy kilogramów na godzinę [5.92].

W procesach technologicznych występują również procesy pomocnicze. Zachodzą one w oprzyrządowaniu technologicznym, które stanowią środki produkcji będące pomocniczymi w stosunku do maszyn, narzędzi i urządzeń uzupełniających.

Jeżeli gotowy do użytkowania wytwór lub przetwór jest otrzymywany w więcej niż jednym procesie technologicznym lub proces technologiczny przetwórstwa stanowi część składową dużego procesu produkcyjnego, to pomiędzy procesami technologicznymi zachodzą powiązania (rys. 5.35) polegające na przepływie i przetworzeniu tworzywa, energii oraz informacji.



Rys. 5.35. Schematyczne przedstawienie procesu technologicznego: *I* — proces uzupełniający przygotowawczy, *II* — podstawowy proces przetwórstwa, *III* — proces uzupełniający zakończeniowy; *1* i *4* — powiązania z innymi procesami technologicznymi, *2* i *3* — przepływ tworzywa, energii i informacji w procesie technologicznym

Duże znaczenie ma podział procesu technologicznego ze względu na występujący w nim podstawowy proces technologiczny. Według tego kryterium procesy technologiczne dzieli się zgodnie z metodami przetwórstwa, a więc może być np. proces technologiczny zgrzewania, wytłaczania, wtryskiwania, kalandrowania, formowania polimeryzacyjnego itp. Jeżeli podstawowy proces przetwórstwa jest ciągły, to na ogół również ciągły jest cały proces technologiczny oraz jeżeli podstawowy proces jest cykliczny, to zazwyczaj także cały proces technologiczny jest cykliczny. Zdarzają się jednak przypadki, że proces technologiczny do określonej operacji jest ciągły, a następnie przechodzi w cykliczny lub odwrotnie.

Procesy technologiczne mogą być prowadzone w liniach technologicznych bądź na stanowiskach technologicznych. Budowa i charakterystyka linii lub stanowiska zależą od kształtu i wymiarów wytworu bądź cech przetworu, właściwości tworzywa, żądanej jakości i wydajności linii lub stanowiska. Przyjmuje się zasadę, że kształt i wymiary wytworu bądź cechy przetworu oraz właściwości tworzywa mają przede wszystkim wpływ na rozwiązania konstrukcyjne i funkcjonalne elementów składowych linii i stanowisk. Natomiast ze zwiększaniem się wymagań co do jakości wytworu lub przetworu i wzrostem wydajności, powiększa się liczba elementów składowych linii lub stanowisk; stają się one bardziej złożone.

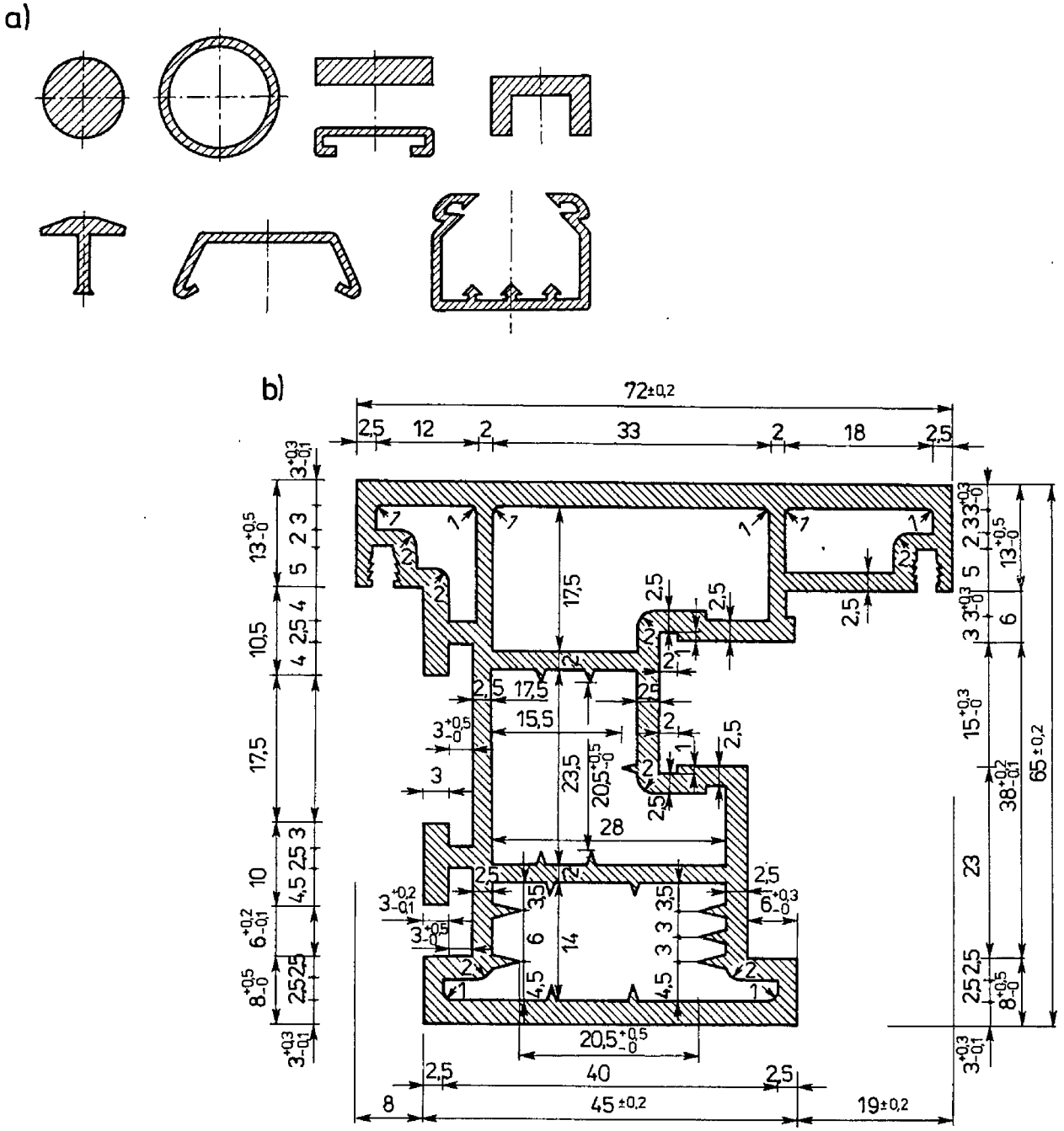
Procesy technologiczne będą przedstawione bardziej szczegółowo w podziale na dwie grupy: a) procesy PFC II i b) procesy PFC I oraz PCF.

5.5. Procesy technologiczne PFC II

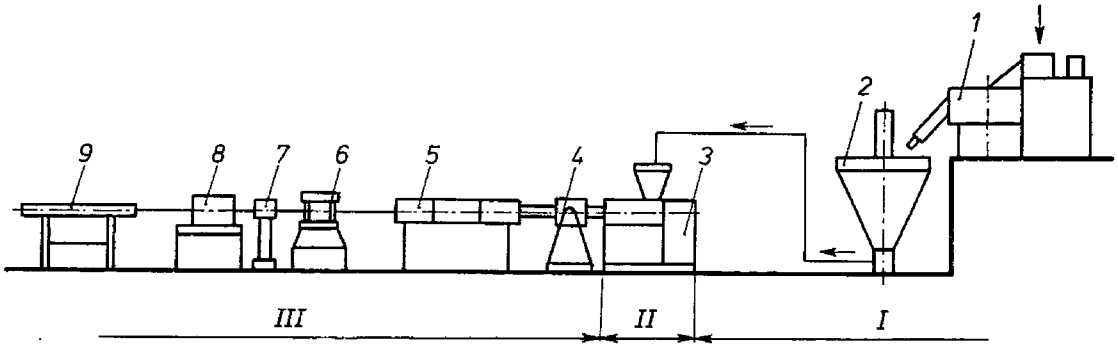
Procesy technologiczne przetwórstwa fizyczno-chemicznego II rodzaju (PFC II) obejmują nie tylko procesy zgodne z metodami przetwórstwa przedstawionymi w rozdziale 3, ale również procesy będące połączeniem tych procesów z procesami zachodzącymi według innych metod przetwórstwa, a także obróbki. Ich w miarę wyczerpujące omówienie znacznie przekraczałoby ustalone ramy niniejszego rozdziału. W związku z tym będą opisane te procesy technologiczne, które mają największe znaczenie i które odbywają się w typowych liniach i na typowych stanowiskach technologicznych.

5.5.1. Wytłaczanie kształtowników, płyt i folii

Procesy technologiczne, w których podstawowym procesem jest wytłaczanie kształtowników (profili), płyt i folii, są prowadzone w *liniach technologicznych wytłaczania*. Kształtowniki wytłaczane (profile wytłaczane) mogą mieć bardzo różny kształt przekroju poprzecznego (rys. 5.36), ale szczególne znaczenie ma wytłaczanie rur z PVC [5.9]. W ujęciu ogólnym linia technologiczna wytłaczania kształtowników składa się z następujących elementów składowych (rys. 5.37): mieszarki (*1*), zbiornika tworzywa (*2*), wytłaczarki z głowicą (*3*), urządzenia kalibrującego — kalibratora (*4*), urządzenia chłodzącego (*5*), urządzenia odbierającego (*6*), urządzenia do znakowania kształtowników (*7*), przecinarki (*8*), urządzenia do układania kształtowników i ich



Rys. 5.36. Niektóre kształtowniki wytłaczane: a) wygląd ogólny przekroju poprzecznego, b) rysunek konstrukcyjny przekroju poprzecznego ramiaka okiennego [5.3]



Rys. 5.37. Schemat linii technologicznej wytłaczania kształtowników: *I, II, III* — jak w podpisie pod rysunkiem 5.35; pozostałe oznaczenia w tekście

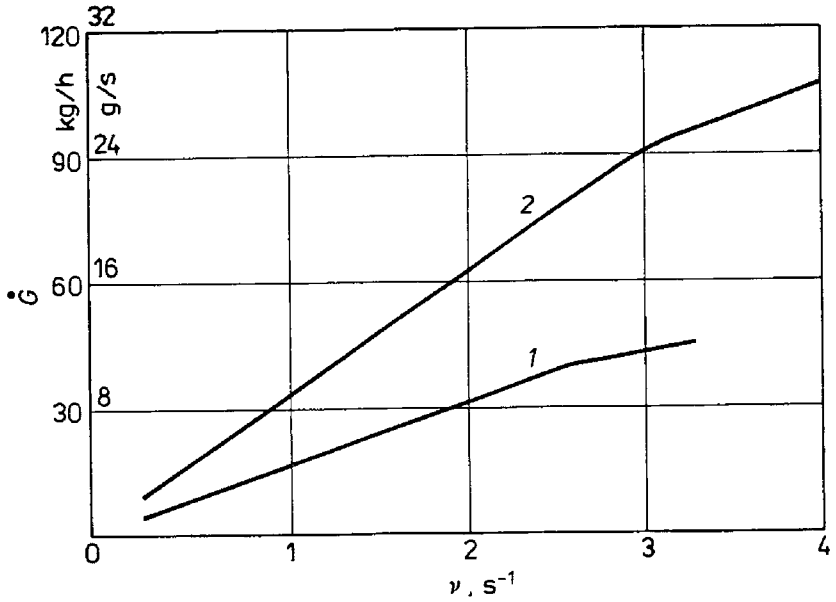
obróbki, np. w przypadku rur wodociągowych i sanitarnych — kielichowania (*9*). Wytłaczarka może być zaopatrywana również tworzywem wprowadzanym bezpośrednio do zasobnika i wówczas linia nie ma mieszarki i zbiornika.

Pomiędzy wytłaczarką i głowicą wytłaczarską można umieścić pompę zębatą (np. o wydajności 0,5÷4600 kg/h i ciśnieniu do 35 MPa), co likwiduje pulsację ciśnienia i natężenia przepływu tworzywa. W takim przypadku funkcję sprężenia przejmuje pompa zębata, w związku z czym zwiększa się natężenie przepływu tworzywa w układzie uplastyczniającym.

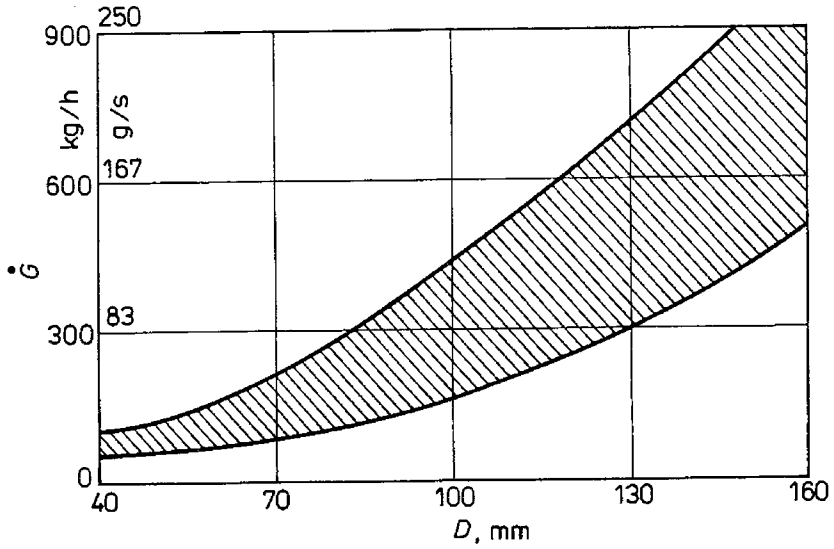
W przypadku współwytłaczania wytłaczarki są dwie lub jest ich więcej, każda z oddzielnymi urządzeniami uzupełniającymi przygotowawczymi. Na przykład linia technologiczna współwytłaczania rur kanalizacyjnych z PVC trójwarstwowego: warstwa PVC twardego, PVC porowatego i PVC twardego, zawiera trzy odrębne wytłaczarki dwuślimakowe [5.104].

Wydajność linii jest determinowana wydajnością (natężeniem przepływu tworzywa) wytłaczarki, a ściślej jej układu uplastyczniającego. Wydajność ta zależy przede wszystkim od rozwiązania konstrukcyjnego ślimaka i cylindra, spadku ciśnienia tworzywa w układzie uplastyczniającym oraz lepkości tworzywa; przy określonych założeniach, dla jednoślimakowego układu klasycznego ujmuje to wzór (1.78), natomiast dla dwuślimakowego układu walcowego klasycznego — wzór (1.94). Z inżynierskiego punktu widzenia ważna jest znajomość zależności wydajności od prędkości obrotowej ślimaka, która na ogół do określonej prędkości obrotowej rośnie niemal wprost proporcjonalnie, a po jej przekroczeniu intensywność wzrostu spada (rys. 5.38), czemu towarzyszy pogarszanie się jakości wytłoczyny. Istotna jest także znajomość zależności wydajności od średnicy ślimaka; w każdym przypadku z powiększaniem się średnicy wydajność rośnie (rys. 5.39).

Jak wspomniano w rozdz. 3, p. 3.1.1, żądany kształt i wymiary przekroju poprzecznego nadaje wytłoczynie dysza głowicy wytłaczarskiej (rys. 3.10) z uwzględnieniem efektu Barusa i zjawiska skurczu. W przypadku jednak, gdy stawia się wysokie wymagania co do dokładności kształtu i wymiaru przekroju poprzecznego, konieczne jest utrwalanie kształtu i wymiaru poprzez *kalibrowanie wytłoczyny*. Kalibrowanie charakteryzuje się bogatą literaturą. Dzieli się ono na następujące rodzaje: zewnętrzne wewnętrzne i kombinowane.

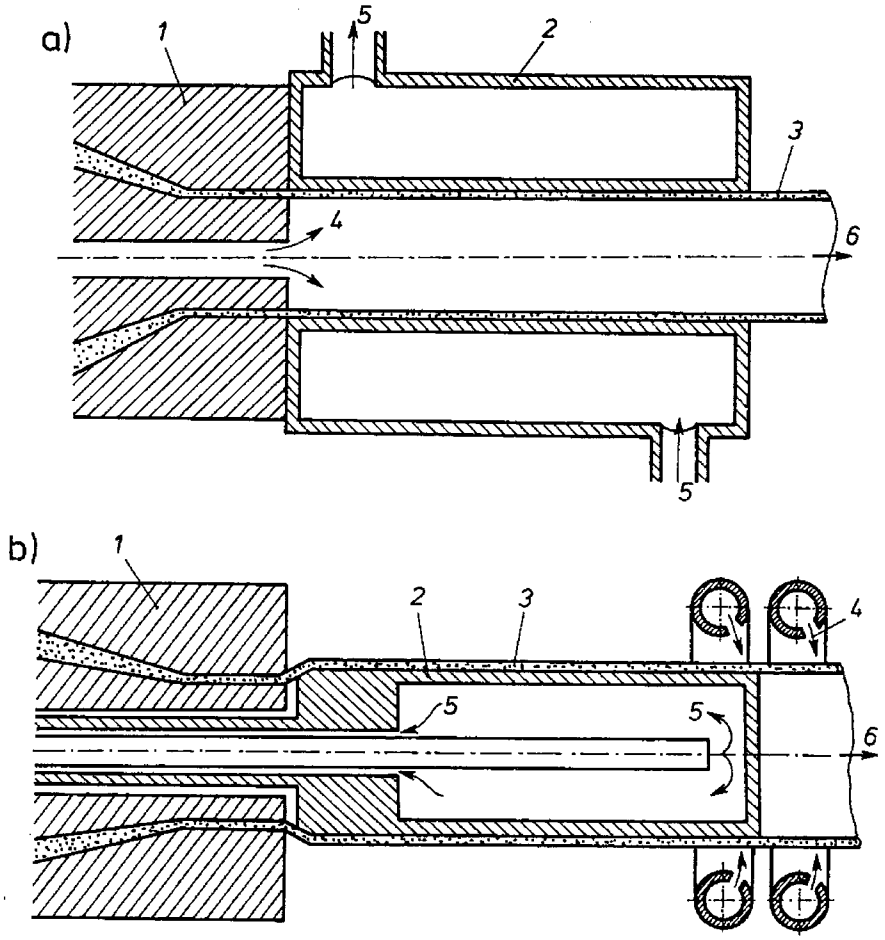


Rys. 5.38. Zależność wydajności $\dot{G}$ od prędkości obrotowej ν ślimaka o D = 45 mm podczas jednoślimakowego wytłaczania PE-LD (Politen II 003/GO) w porównywalnych warunkach dla różnych rozwiązań konstrukcyjnych ślimaka: *1* — ślimak klasyczny, *2* — ślimak specjalny [5.111]



Rys. 5.39. Zależność wydajności $\dot{G}$ od średnicy D ślimaków w czasie wytłaczania dwuślimakowego kształtowników, zwłaszcza rur, oraz płyt z twardego PVC (opracowano na podstawie wielu różnych źródeł)

Kalibrowanie zewnętrzne (rys. 5.40a) polega na tym, że wytłoczyna po opuszczeniu dyszy głowicy jest przeprowadzana przez chłodzoną tuleję kalibrującą o danej średnicy i długości z określonym dociskiem do niej. W tym czasie, na skutek różnicy temperatury pomiędzy wytłoczyną a powierzchnią tulei, następuje ochładzanie wytłoczyny, a ponieważ jej kształt i wymiary zewnętrzne są narzucone przez kształt i wymiary wewnętrzne tulei, zostają one utrwalone. Aby to następowało efektywnie, wytłoczyna musi być dociskana do tulei, co się przeprowadza dwom sposobami, które determinują dalszy podział kalibrowania zewnętrznego: wprowadzenie do wnętrza wytłoczyny powietrza pod ciśnieniem (możliwe tylko w przypadku wytłoczyny wewnątrz pustej) — *kalibrowanie ciśnieniowe*, jak również wytworzenie w obszarze między wytłoczyną a tuleją podciśnienia — *kalibrowanie próżniowe*. Ocenia się, że



Rys. 5.40. Podstawowe rodzaje kalibrowania (istota): a) kalibrowanie zewnętrzne, b) kalibrowanie wewnętrzne; *1* — korpus głowicy, *2* — korpus kalibratora (tuleja lub trzpień), *3* — wytłoczyna, np. rura, *4* — sprężone powietrze, *5* — woda chłodząca, *6* — kierunek ruchu wytłoczyny

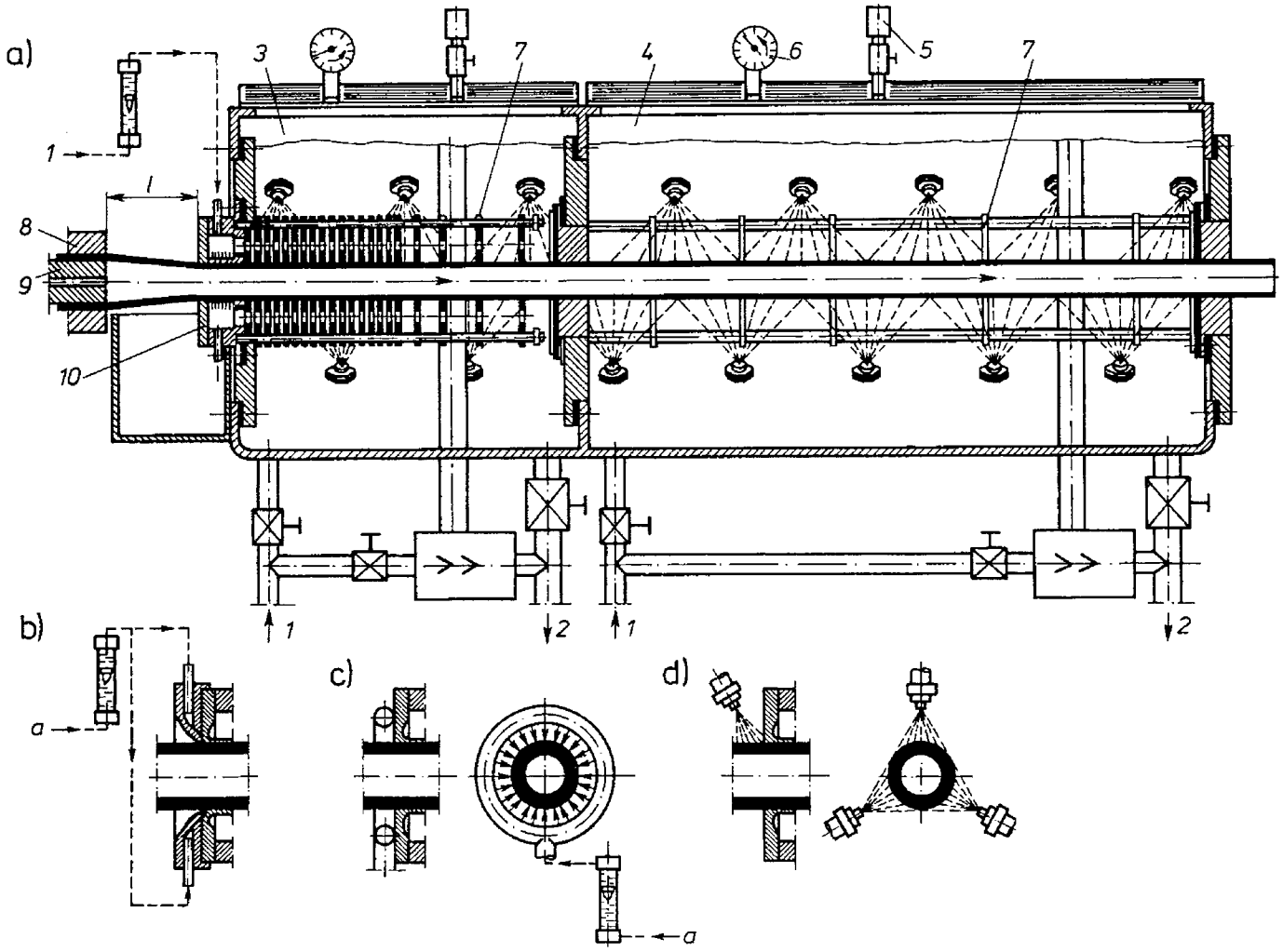
około 95% procesów kalibrowania to kalibrowanie zewnętrzne, a kalibrowanie zewnętrzne ciśnieniowe jest najstarsze, stosowała je bowiem już w 1946 r. firma Tenaplas [5.109]. Obliczenia dotyczące kalibrowania zewnętrznego są dość złożone [5.11, 5.50, 5.102] — dysponuje się zarówno wzorami do obliczeń, jak i zestawieniami tabelarycznymi, np. zalecanych długości tulei w zależności od średnicy rury kalib-

Tablica 5.19

Zależność długości tulei kalibrującej od średnicy rury kalibrowanej dla niektórych tworzyw przy przeciętnie występujących prędkościach kalibrowania ($0{,}08 < v_k < 0{,}35$ m/s)

Średnica rury równa średnicy tulei mm	Stosunek długości do średnicy tulei kalibrującej	
	poliolefiny (poliolefiny)	PVC
16÷50	5÷7	5÷9,1
63÷90	3,6÷4,5	3,6÷5,8
110÷160	3÷3,6	3÷4,7
180÷400	2,4÷3	2,4÷3,9
450÷630	2÷2,4	2÷3,1
710÷1000	1,6÷2	1,6÷2,6
powyżej 1000	1,2÷1,6	1,2÷2,1

rowanej (tabl. 5.19). Ze wzrostem prędkości kalibrowania zmniejsza się skurcz pierwotny poprzeczny. Od połowy lat siedemdziesiątych do kalibrowania rur stosuje się chętnie kalibrowanie zewnętrzne próżniowe z układem tarcz kalibrujących, z chłodzeniem bezpośrednim rozbryzgowym wodą (rys. 5.41), zwane potocznie *kalibrowaniem lamelowym* [5.8, 5.15].

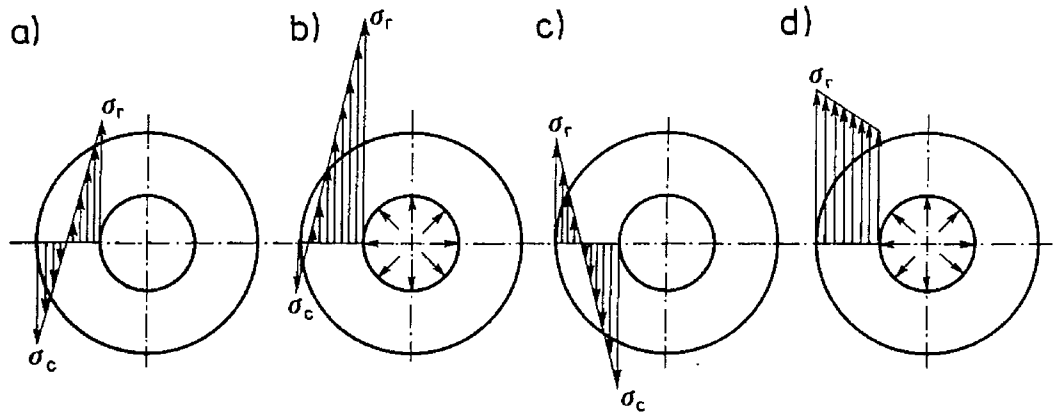


Rys. 5.41. Kalibrator tarczowy próżniowo-rozbryzgowy (lamelowy): a) przekrój wzdłużny, b), c), d) warianty ochładzania wytłoczyny; *1* — dopływ wody chłodzącej, *2* — odpływ wody, *3* — pierwsza komora, *4* — druga komora, *5* — zawór instalacji próżniowej, *6* — manometr, *7* — tarcze kalibrujące, *8* — korpus głowicy, *9* — rdzeń głowicy, *10* — wejściowa tuleja kalibrująca, *l* — odległość pomiędzy głowicą a kalibratorem (regulowana)

Kalibrowanie wewnętrzne (rys. 5.40b) polega na przeprowadzeniu wytłoczyny wewnątrz pustej, po opuszczeniu dyszy głowicy, przez chłodzony trzpień o danej średnicy i długości z określonym dociskiem do niego. Docisk jest skutkiem kurczenia się wytłoczyny. Tarcie wytłoczyny o powierzchnię trzpienia jest na ogół znacznie większe niż podczas kalibrowania zewnętrznego. Aby je zmniejszyć, stosuje się dodatkowe ochładzanie wytłoczyny za pomocą nadmuchu powietrza, rzadziej natrysku wodą, na jej powierzchnię zewnętrzną. Powierzchnia zewnętrzna trzpienia powinna mieć temperaturę 70÷85°C dla PE i PVC oraz 50÷60°C dla PP. Kalibrowanie wewnętrzne stosuje się przede wszystkim do otrzymywania rur cienkościennych, o grubości do 3,5 mm i o małych średnicach, do 70 mm.

Jako *kalibrowanie kombinowane* traktuje się połączenie kalibrowania zewnętrznego i wewnętrznego, jak również kalibrowanie zewnętrzne połączone: ciśnieniowe i próżniowe. Kalibrowanie kombinowane jest rzadko stosowane.

Rodzaj kalibrowania ma istotny wpływ na rozkład naprężeń własnych w wytłoczynie. W przypadku rur, kalibrowanie wewnętrzne powoduje bardziej korzystny rozkład



Rys. 5.42. Rozkład naprężeń własnych w rurze po zakończonym procesie kalibrowania zewnętrznego (a) i wewnętrznego (c) oraz naprężeń eksploatacyjnych przy przepływie płynu pod ciśnieniem, odpowiednio (b) oraz (d); σ_r — naprężenie rozciągające, σ_c — naprężenie ściskające

naprężeń własnych po procesie kalibrowania, pozwalający na przenoszenie większego ciśnienia płynu w rurze (rys. 5.42).

Wydajność linii technologicznej wytłaczania bywa często ograniczana wydajnością kalibrowania. Wydajność teoretyczna $\dot{W}_t$ lub $\dot{G}_t$ kalibratora (bliżej o wydajności linii w p. 5.7.2) kalibrującego z prędkością v_k wytłoczynę o gęstości ρ, o polu powierzchni przekroju poprzecznego A wynosi

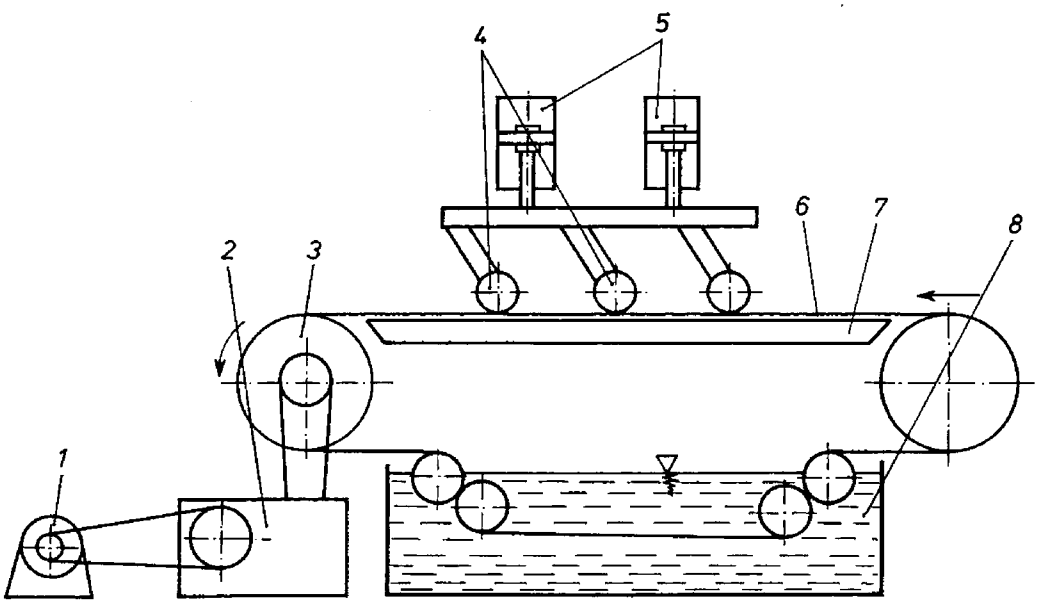
$$\dot{W}_t = A\, v_k \tag{5.30}$$

lub

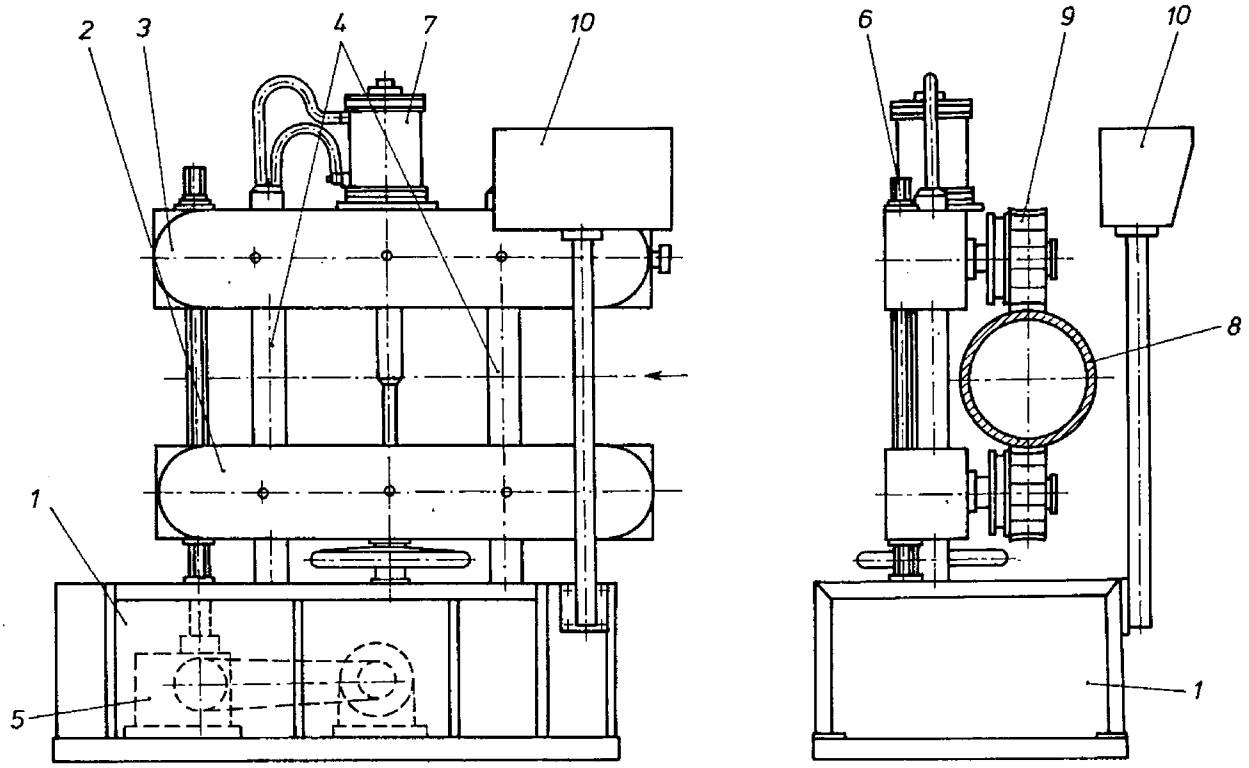
$$\dot{G}_t = A\, v_k \rho \tag{5.31}$$

W przypadku kształtowników o większej grubości ścianek, orientacyjnie o grubości większej niż 4 mm, ochładzanie w czasie kalibrowania na ogół nie wystarcza i kształtowniki należy dodatkowo ochładzać w *urządzeniu chłodzącym* [5.82]. Urządzenie to stosuje się bezwzględnie, gdy nie używa się kalibratora. Urządzenia chłodzące mają kształt długich wanien z doprowadzeniem i odprowadzeniem wody chłodzącej, często z zamontowanymi rolkami, po których przesuwa się kształtownik, zanurzony w wodzie lub nią spryskiwany.

Urządzenie odbierające służy do wyciągania kształtownika z dyszy, przeprowadzania go przez kalibrator i urządzenie chłodzące oraz podawania do następnych elementów składowych linii technologicznej. Cechą charakterystyczną urządzenia odbierającego jest możliwość ciągłej regulacji prędkości przesuwania kształtownika, dostosowywanej do prędkości kalibrowania. Kształtownik jest przesuwany przy wykorzystaniu siły tarcia występującej pomiędzy nim a elementami napędowymi, spełniającymi również funkcje podtrzymujące i dociskające. W zależności od kształtu tych elementów, urządzenia odbierające dzielą się głównie na: kołowe, taśmowe, gąsienicowe i walcowe.



Rys. 5.43. Schemat urządzenia odbierającego taśmowego: *1* — silnik elektryczny, *2* — przekładnia bezstopniowa, *3* — wał napędzający taśmę, *4* — rolki dociskające, *5* — cylindry pneumatyczne, *6* — taśma przesuwna, *7* — stół podtrzymujący wytłoczynę, *8* — zbiornik wody chłodzącej taśmę



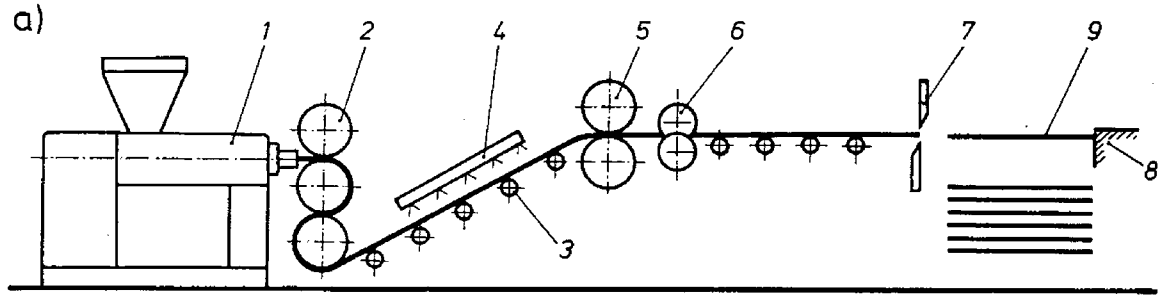
Rys. 5.44. Urządzenie odbierające gąsienicowe: *1* — podstawa urządzenia, *2* — belka dolna, *3* — belka górna, *4* — kolumny do prowadzenia belek ruchem pionowym, *5* — przekładnia bezstopniowa napędzana silnikiem elektrycznym, *6* — wałek napędowy gąsienic, *7* — zespół pneumatyczny do przemieszczania belek, *8* — rura odbierana, *9* — gąsienice, *10* — pulpit sterowniczy

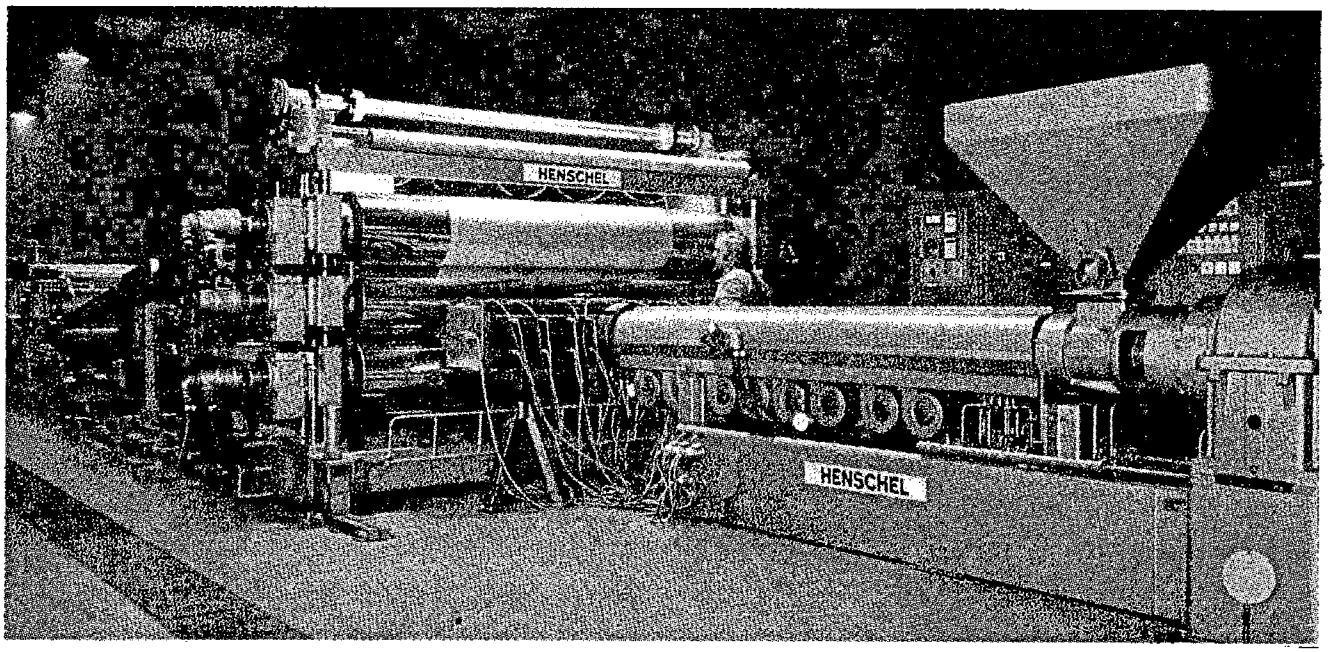
Urządzenie odbierające kołowe należy do najprostszych; składa się z koła, często przymocowanego na końcu urządzenia chłodzącego, mającego na obwodzie rowek klinowy umożliwiający dobre trzymanie się w nim wytłoczyny, np. rurki o małej średnicy, opadającej i obracającej koło pod własnym ciężarem.

Urządzenie odbierające taśmowe pokazano na rys. 5.43, natomiast gąsienicowe z dwoma gąsienicami przeciwległymi z roboczymi elementami gumowymi — na rys.

5.44. Działanie obu urządzeń objaśniono na rysunkach. Spotyka się także urządzenia odbierające gąsienicowe z czterema gąsienicami, co zmniejsza niebezpieczeństwo odkształcania wytłoczyny, można bowiem wówczas stosować mniejsze naciski jednostkowe elementów roboczych gąsienic.

Na rysunku 5.45 przedstawiono schemat klasycznej linii technologicznej wytłaczania płyt płaskich. Po opuszczeniu głowicy szczelinowej wytłaczarki (*1*) wstęga tworzywa o grubości zwykle 1÷9 mm przechodzi przez ogrzewane walce (*2*), przy czym następuje wyrównanie i wygładzenie jej powierzchni, następnie przesuwając się po przenośniku rolkowym (*3*) ochładza się w strumieniu powietrza nadmuchiwanego (*4*). Wstęga może być wprowadzana w górną szczelinę międzywalcową, zazwyczaj podczas wytłaczania płyt o małej szerokości i cieńszych, jak również w dolną szczelinę — gdy płyty są szerokie (np. 1÷3 m) i grubsze (np. 3÷9 mm). Urządzeniem odbierającym jest na ogół koło walcowe (*5*), za którym zamocowane są noże krążkowe (*6*), obcinające brzegi wstęgi; dalej znajdują się nożyce gilotynowe (*7*), w przypadku wstęgi o grubości do około 2,5 mm, lub znajduje się przecinarka tarczowa, w przypadku wstęgi o większej grubości. Nożyce bądź przecinarka są uruchamiane przy zetknięciu się wstęgi ze zderzakiem (*8*). Powstające w ten sposób płyty (*9*) są układane za pomocą urządzenia do układania. Wytłaczarka jest zasilana tworzywem wprowadzanym bezpośrednio do zasobnika lub uprzednio przygotowanym, np. jak

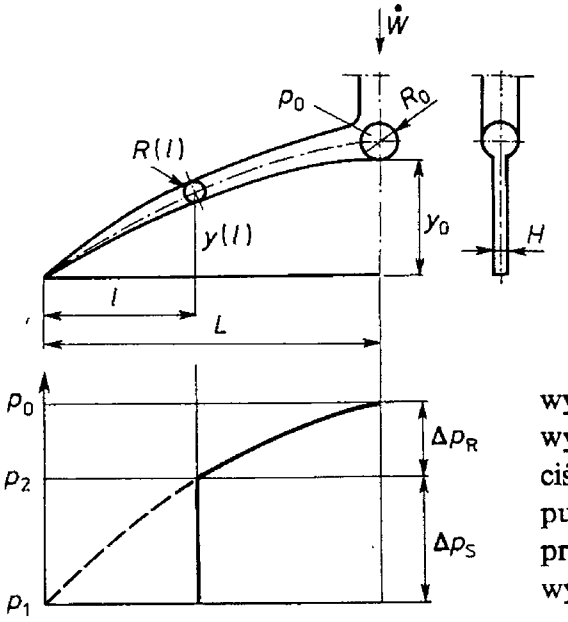




Rys. 5.45. Linia technologiczna klasycznego wytłaczania płyt płaskich: a) schemat (oznaczenia w tekście), b) wygląd ogólny linii firmy Thyssen Henschel Plastik Maschinen GmbH (Niemcy)

w omówionym poprzednio procesie technologicznym wytłaczania kształtowników. Materiał pochodzący z obciętych brzegów wprowadza się z powrotem do wytłaczarki, na ogół w sposób ciągły niezwłocznie po obcięciu.

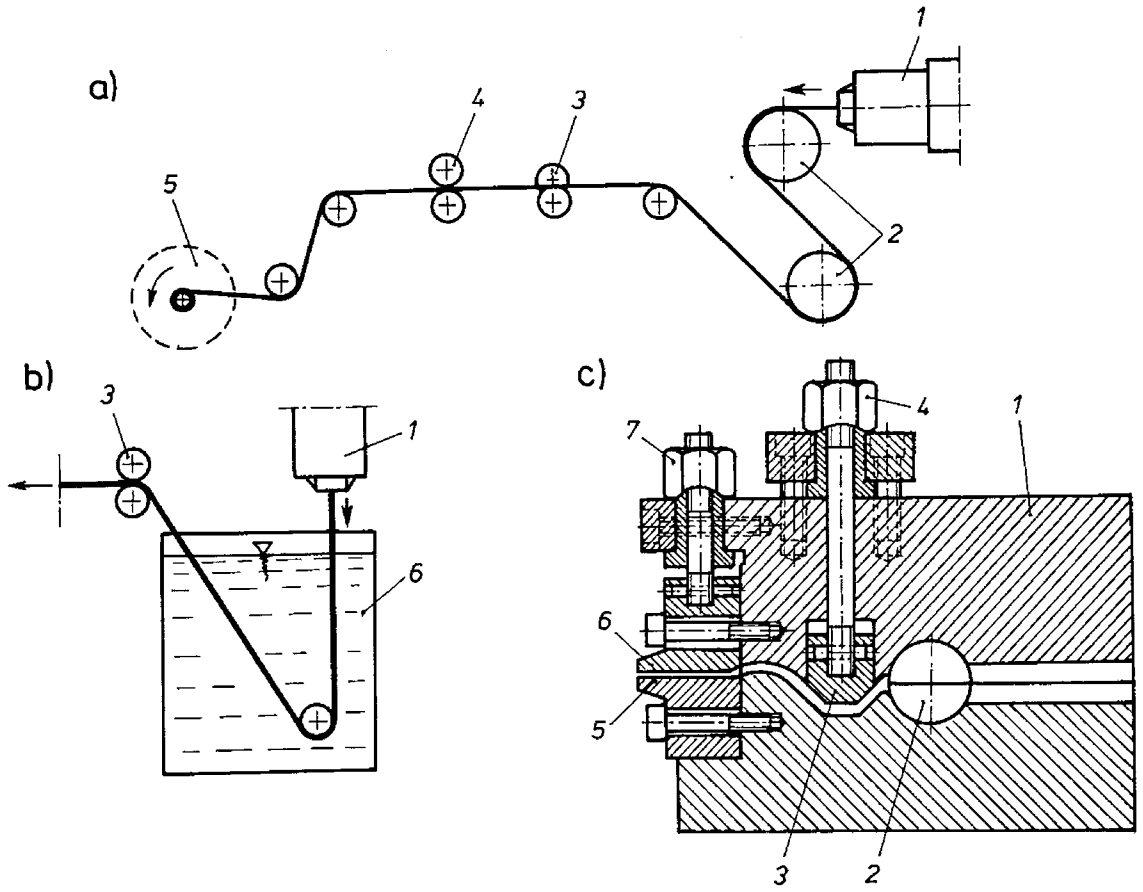
Szczególnym elementem tej linii jest *głowica wytłaczarska szczelinowa*. Podstawowym wymaganiem, jakie jej się stawia, jest zapewnienie opuszczania szczeliny przez tworzywo z jednakowym natężeniem wypływu w każdym punkcie na długości szczeliny. Tworzywo wpływa do głowicy centralnym kanałem przepływowym (rys. 5.46), współosiowym z układem uplastyczniającym wytłaczarki, następnie jest rozprowadzane symetrycznie na szerokość wstęgi dwoma kanałami rozprowadzającymi zwężającymi się, z których wpływa do szczeliny. Obliczenia reologiczne głowic są dość złożone [5.3, 5.78]. W przypadku dobrze zaprojektowanej i wykonanej głowicy szczelinowej, często noże krążkowe (*6*) pokazane na rys. 5.45a są niepotrzebne.



Rys. 5.46. Kształt kanałów przepływowych w głowicy wytłaczarskiej szczelinowej z zaznaczeniem najważniejszych wymiarów podlegających obliczeniom i wykres zależności ciśnienia tworzywa w kanale od odległości l od skrajnego punktu kanału: Δp_R — spadek ciśnienia w kanale rozprowadzającym, Δp_S — spadek ciśnienia w kanale szczelinowym

Niekiedy wytłaczaną wstęgę poddaje się *falowaniu poprzecznemu* lub *wzdłużnemu* w stosunku do kierunku wytłaczania. Fale poprzeczne uzyskuje się na przykład przepuszczając plastyczną jeszcze wstęgę przez układ trzech wałków, często chłodzonych, usytuowanych tak, że tworzące walcowe dwóch z nich, oddalonych od siebie na odległość odpowiadającą długości fali, znajdują się na jednym poziomie, powyżej tworzącej walcowej wałka trzeciego, usytuowanego pośrodku nich. Uzyskanie fal wzdłużnych w linii technologicznej jest bardziej złożone i często falowanie wzdłużne uzyskuje się tak jak poprzeczne, ale na płytach płaskich, uprzednio nagrzanych do właściwej temperatury.

Linia technologiczna wytłaczania folii płaskiej składa się z następujących elementów składowych (rys. 5.47a): zbiornika tworzywa, wytłaczarki, głowicy z dyszą szczelinową płaską (*1*), walców chłodzących (*2*), urządzenia odbierającego (*4*) i urządzenia nawijającego ochłodzoną folię (*5*). Aby uzyskać folię bardziej przezroczystą, należy nadać jej strukturę bezpostaciową, co wiąże się ze zmniejszeniem jej wytrzymałości. Można to efektywnie przeprowadzić wytłaczając folię wprost do wanny z wodą chłodzącą (rys. 5.47b). Trudno jednak uchronić się przed powstawaniem na powierz-



Rys. 5.47. Wytłaczanie folii płaskiej: a) schemat linii technologicznej wytłaczania klasycznego, b) schemat linii technologicznej wytłaczania do wanny z wodą chłodzącą; *1* — głowica, *2* — walce chłodzące, *3* — noże krążkowe, *4* — urządzenie odbierające, *5* — urządzenie nawijające, *6* — wanna z wodą chłodzącą, c) głowica z dyszą szczelinową płaską: *1* — korpus, *2* — kanał rozprowadzający, *3* — listwa dławiąca, *4* — śruba regulująca dławienie przepływu tworzywa, *5* — nieruchoma listwa dyszy, *6* — przesuwna listwa dyszy, *7* — śruba regulacyjna przesuwnej listwy dyszy

chni folii nierówności, wywołanych przez nieuchronne, małe falowanie wody, powodowane ruchem folii i wałka prowadzącego w wodzie. Głowice z dyszą szczelinową płaską mają budowę identyczną jak głowice do powlekania taśm (rys. 3.21b oraz c) lub zawierają listwę dławiącą przepływ tworzywa (rys. 5.47c), niekiedy segmentową, która przy niezależnym przesuwaniu segmentów wywołuje różne dławienie na długości dyszy w zależności od warunków przepływu w dyszy, tak aby zachować jednakowe natężenie wypływu tworzywa. Regulacja szerokości szczeliny odbywa się często automatycznie z użyciem translatorów piezoelektrycznych [5.2], przy sprzężeniu z ciągłym pomiarem tej szerokości [5.131]. Urządzenie odbierające tworzą dwa walce, z których jeden jest napędzany z prędkością liniową większą od prędkości wytłaczania folii, co przy docisku do siebie i sile tarcia występującej pomiędzy folią a walcami powoduje rozciąganie, a więc orientowanie folii. Podczas rozciągania folii zachodzi zmniejszenie jej szerokości w granicach $10 \div 20\%$.

Współwytłaczanie płyt i folii jest stosowane coraz częściej, gdyż uzyskuje się przez to bardzo interesujące rezultaty [5.100]. Na przykład terpolimer ABS charakteryzuje się małą odpornością na starzenie wobec swiatła słonecznego i tlenu. Współwytłacza się więc płyty trójwarstwowe: folia PVDC o grubości $50 \div 300$ μm, płyta ABS o grubości $1 \div 9$ mm i folia PVDC o grubości również $50 \div 300$ μm, odznaczające się istotnie

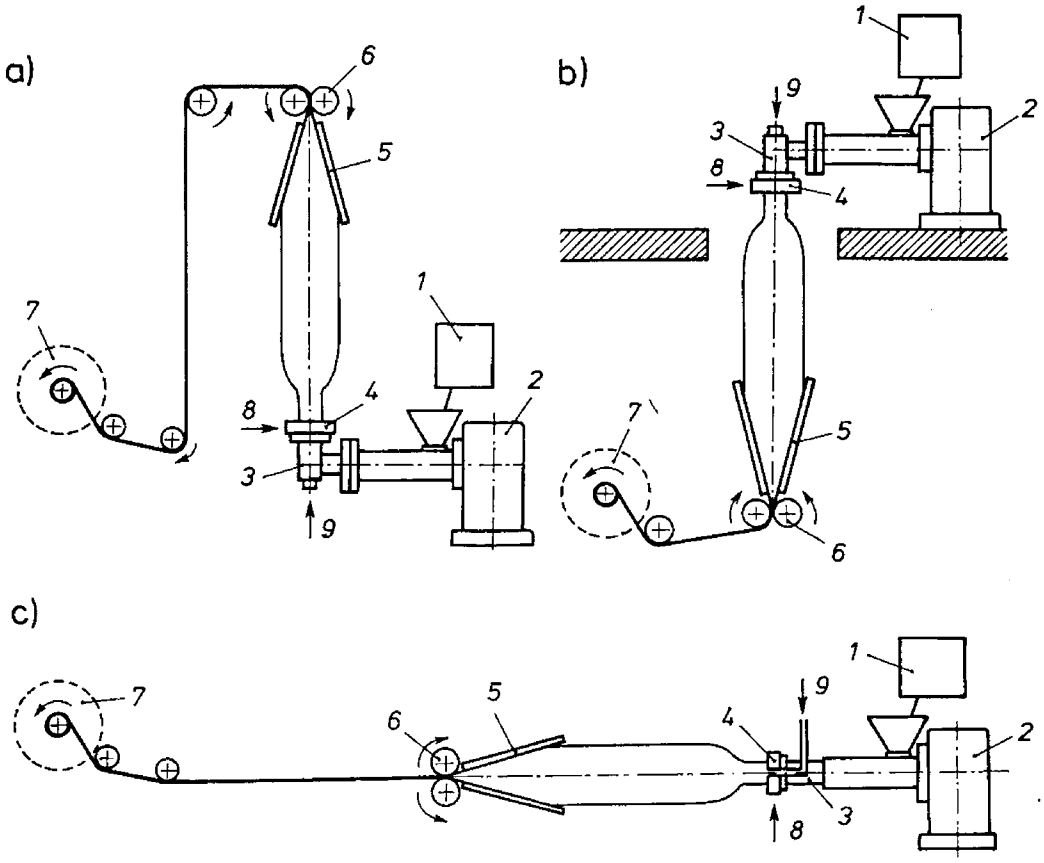
podwyższoną odpornością na starzenie. Pomiędzy folie PVDC i płytę ABS wprowadza się cienką warstwę kleju akrylowego [5.67].

5.5.2. Wytłaczanie z rozdmuchiwaniem swobodnym

Proces technologiczny wytłaczania z rozdmuchiwaniem może przebiegać przy nieograniczeniu mechanicznym procesu rozdmuchiwania i wówczas nazywa się umownie swobodnym, a w jego rezultacie otrzymuje się folię rurową z tworzyw termoplastycznych, poddawaną następnie innym procesom przetwórstwa lub obróbki, np. rozcinaniu, zgrzewaniu, drukowaniu.

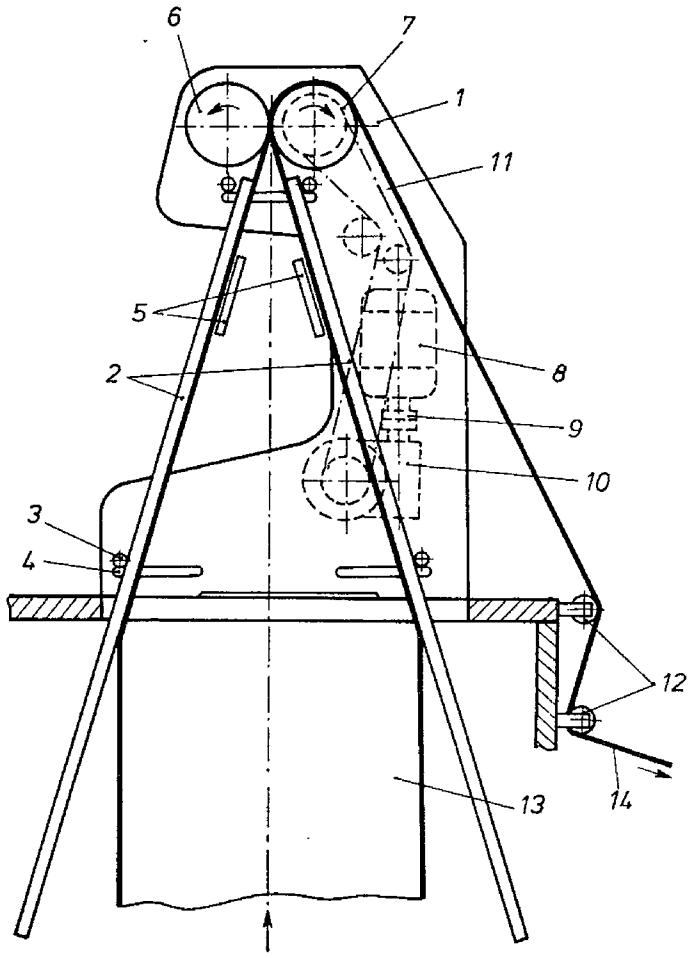
Proces technologiczny *wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym* polega na wytłoczeniu rury cienkościennej i natychmiastowym jej rozdmuchaniu za pomocą powietrza o nieznacznym ciśnieniu i wyciągnięciu za pomocą urządzenia odbierającego. W czasie rozdmuchiwania zachodzi przede wszystkim rozciąganie w kierunku poprzecznym, natomiast podczas wyciągania następuje rozciąganie w kierunku wzdłużnym. Aby lepiej sterować procesem rozciągania poprzecznego i wzdłużnego, rura wytłaczana jest ochładzana bezpośrednio za dyszą głowicy w strumieniu powietrza z urządzenia nadmuchującego. Otrzymana w ten sposób folia uważana jest za nieorientowaną, a z punktu widzenia kurczenia się pod wpływem ciepła — w zależności od warunków procesu [5.63] — za zwykłą lub termokurczliwą.

Folię rurową można otrzymać poprzez wytłaczanie z rozdmuchiwaniem: pionowo w górę, pionowo w dół i poziomo (rys. 5.48). W każdym z tych przypadków linia



Rys. 5.48. Podstawowe możliwości wytłaczania z rozdmuchiwaniem: a) pionowo w górę, b) pionowo w dół, c) poziomo: *1* — zbiornik tworzywa, *2* — wytłaczarka, *3* — głowica, *4* — urządzenie nadmuchujące chłodzące, *5* — urządzenie spłaszczające, *6* — urządzenie odbierające, *7* — urządzenie nawijające, *8* — dopływ stały powietrza chłodzącego, *9* — doprowadzenie okresowe powietrza rozdmuchującego

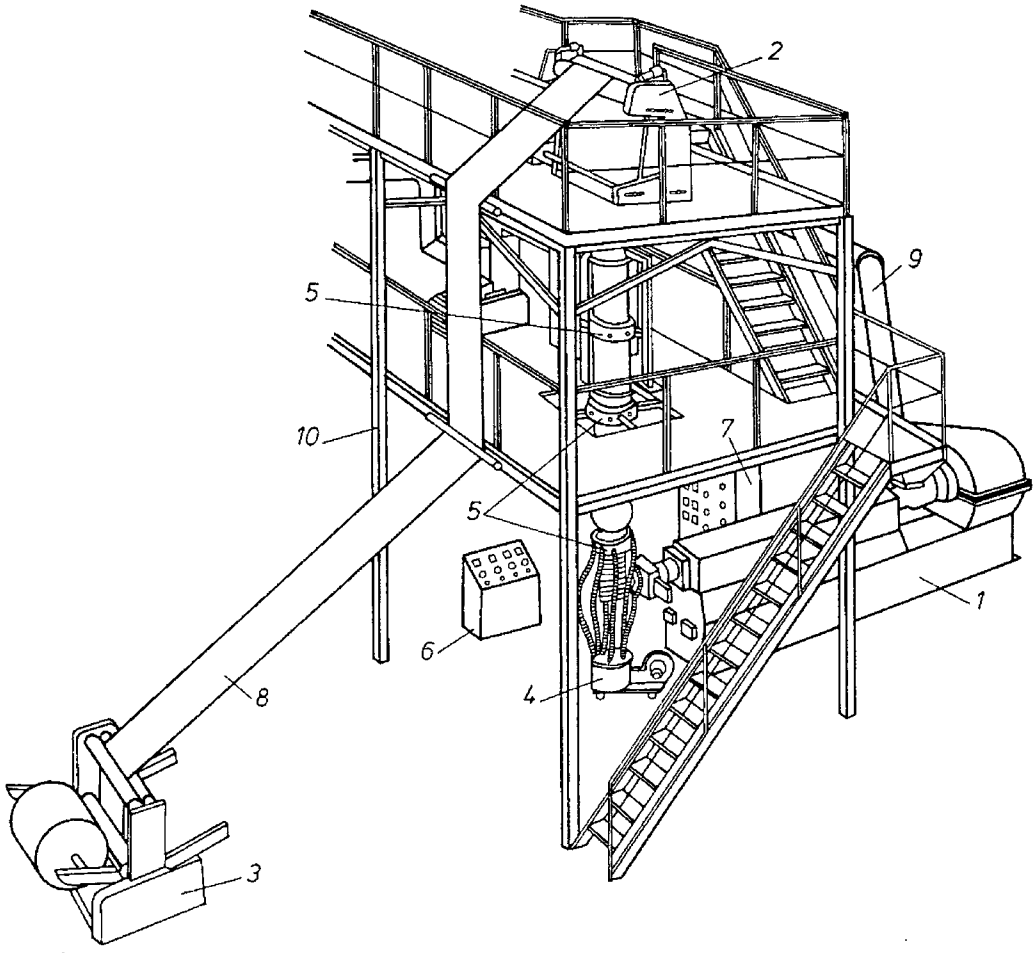
technologiczna wytłaczania z rozdmuchiwaniem składa się z następujących elementów składowych: zbiornika tworzywa (*1*), wytłaczarki (*2*), głowicy (*3*), urządzenia nadmuchującego chłodzącego (*4*), urządzenia spłaszczającego (*5*), urządzenia odbierającego (*6*) i urządzenia nawijającego (*7*). Zaopatrywanie wytłaczarki w tworzywo może odbywać się jak w poprzednio przedstawionych procesach technologicznych wytłaczania. Powietrze rozdmuchujące wprowadza się do wewnątrz rury poprzez dyszę głowicy (rys. 3.11a), a ponieważ rura z jednej strony jest ograniczona urządzeniem spłaszczającym i odbierającym, rozdmuchiwana i wyciągana, rura nazywa się często rękawem folii. Stosuje się również głowice kątowe z dyszą szczelinową pierścieniową, w których część głowicy związana z dyszą wykonuje ruch obrotowy, w związku z czym jest łożyskowana, zwykle tocznie. Po ochłodzeniu zasadniczym rękaw folii jest spłaszczany za pomocą urządzenia spłaszczającego, które stanowią dwie płyty ślizgowe ustawione względem siebie pod kątem, bądź tak samo ustawiony układ rolek (rys. 5.49). Urządzenie odbierające stanowią dwa dociskane do siebie walce; metalowy chłodzony i gumowy napędzany, które wskutek siły tarcia występującej pomiędzy folią a walcami i odpowiedniej prędkości wyciągają rurę wytłaczaną. Przez urządzenie odbierające przechodzi zatem spłaszczony rękaw folii,



Rys. 5.49. Urządzenie spłaszczające i odbierające: *1* — korpus, *2* — płyty ślizgowe, *3* — wałki z kółkami zębatymi do regulacji kąta zawartego pomiędzy płytami, *4* — zębatka, *5* — dysze powietrzne do chłodzenia dodatkowego folii, *6* — walec metalowy chłodzony, *7* — walec gumowy napędzany, *8* — silnik elektryczny, *9* — sprzęgło, *10* — przekładnia ślimakowa, *11* — przekładnia łańcuchowa, *12* — rolki prowadzące, *13* — rękaw folii, *14* — folia spłaszczona

który powinien być wolny od zmarszczeń i fałd. Z kolei ochłodzona folia jest nawijana na wale urządzenia nawijającego z prędkością przekraczającą nawet 3,33 m/s; wał może wykonywać oscylacyjny ruch postępowo-zwrotny, powodujący zmniejszenie zgrubienia zwoju na bokach rękawa.

Najczęściej spotyka się *wytłaczanie z rozdmuchiwaniem pionowo w górę*. Produkcyjne linie technologiczne wytłaczania z rozdmuchiwaniem pionowo w górę mają duże rozmiary — częstokroć zajmują 2÷3 kondygnacje. W przykładzie pokazanym na rys. 5.50 folia nawinięta na wale urządzenia nawijającego jest następnie rozcinana poprzecznie i zgrzewana tworząc worki, np. na produkty spożywcze lub nawozy mineralne. Interesujące jest wytłaczanie pionowo w dół wprost do wanny z wodą chłodzącą, opatentowane w kilku krajach przez W. Dahliga i współpracowników [5.22].

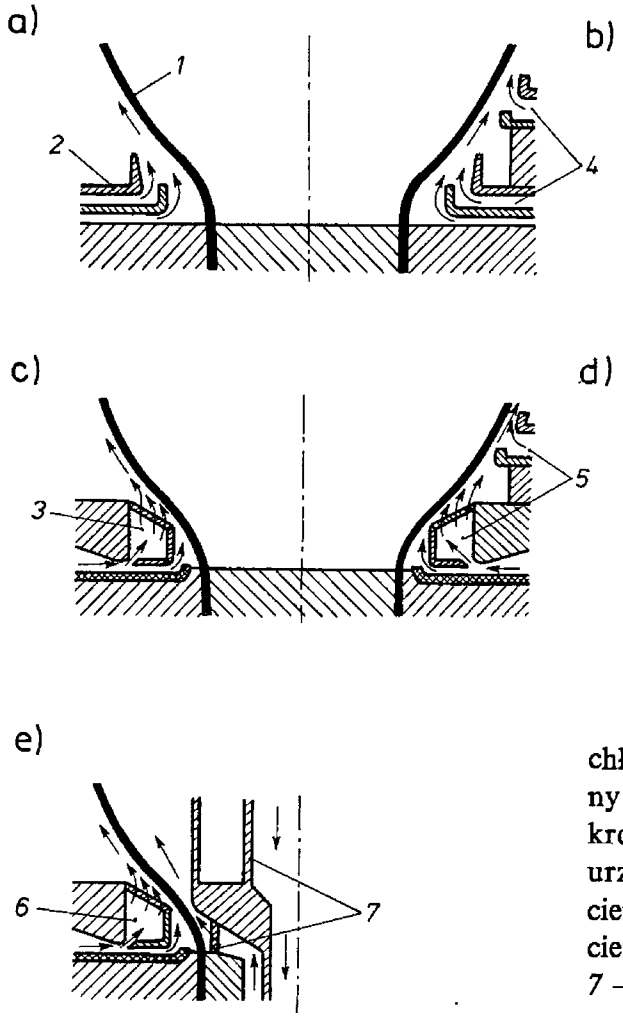


Rys. 5.50. Linia technologiczna wytłaczania z rozdmuchiwaniem pionowo w górę: *1* — wytłaczarka, *2* — urządzenie spłaszczające i odbierające, *3* — urządzenie nawijające, *4* — wentylator doprowadzający powietrze chłodzące, *5* — pierścienie chłodzące, *6* i *7* — szafy z urządzeniami automatycznego sterowania i regulacji, *8* — spłaszczona folia rurowa, *9* — rurociąg zasilający wytłaczarkę w tworzywo wytłaczane, *10* — konstrukcja nośna

Stosuje się także współwytłaczanie z rozdmuchiwaniem — linia technologiczna ma wówczas dwie lub więcej wytłaczarek, każdą z oddzielnymi urządzeniami przygotowawczymi. Na przykład spotyka się wytłaczanie z rozdmuchiwaniem folii dwuwarstwowej, PE+E/VAC o grubości 0,06÷0,2 mm [5.98], trójwarstwowej, PE-

LLD+PE-LD+PE-LLD [5.81], cztero- i pięciowarstwowej; np. PE-LD+ +E/VAC+PP+E/VAC+PE-LD [5.20].

Zasadnicze ochładzanie folii odbywa się w urządzeniu nadmuchującym chłodzącym, które stanowią pierścienie z otworami od strony folii, główny — przymocowany do głowicy, i pomocnicze — przymocowane do konstrukcji nośnej linii. Na ogół pierścienie mają różny przekrój poprzeczny oraz ścianki kierujące powietrze (rys. 5.51). Do pierścieni tych doprowadza się oczyszczone w filtrach powietrze ze sprężarki



Rys. 5.51. Ważniejsze rodzaje głównego pierścienia chłodzącego urządzeń nadmuchujących: a) i c) jednokrotny zewnętrzny, b) i d) dwukrotny zewnętrzny, e) jednokrotny obustronny; *1* — folia, *2* i *3* — pierścienie urządzenia jednokrotnego zewnętrznego, *4* i *5* — pierścienie urządzenia dwukrotnego zewnętrznego, *6* — pierścień urządzenia jednokrotnego obustronnego, *7* — trzpień urządzenia jednokrotnego obustronnego

lub bezpośrednio z dmuchawy. Sposób i intensywność chłodzenia ma wpływ na przebieg rozciągania i przez to m.in. na skurcz folii w kierunku wzdłużnym i poprzecznym. Całkowity *stopień rozciągania folii w kierunku wzdłużnym*, R_w, określa się jako stosunek prędkości v_1 odbierania folii do prędkości v_0, z jaką wytłoczyna opuszcza dyszę głowicy

$$R_w = \frac{v_1}{v_0} \tag{5.32}$$

natomiast *stopień rozciągania w kierunku poprzecznym*, R_p, równy *stopniowi rozdmuchania*, określa się jako stosunek średnicy D rękawa, do średnicy d otworu wylotowego dyszy, przy pominięciu grubości folii ze względu na jej bardzo małą wartość w stosunku do wymienionych średnic

$$R_p = \frac{D}{d} = \frac{2\ B}{\pi\ d} \tag{5.33}$$

gdzie B oznacza szerokość spłaszczonej folii. Ponieważ objętościowe natężenie $\dot{W}$ przepływu wytłoczyny musi być stałe, więc podczas opuszczania przez wytłoczynę dyszy o szerokości szczeliny pierścieniowej otworu wylotowego g_0

$$\dot{W} = v_0\, \pi\, d\, g_0 \tag{5.34}$$

a przy odbieraniu folii o grubości g_1

$$\dot{W} = v_1\, \pi\, D\, g_1 \tag{5.35}$$

Zatem podstawiając do wzoru (5.32) wyrażenia na v_0 i v_1 otrzymane z przekształcenia wzorów (5.34) i (5.35), otrzymuje się

$$R_w = \frac{g_0}{g_1}\frac{d}{D} = \frac{g_0}{g_1}\frac{1}{R_p} \tag{5.36}$$

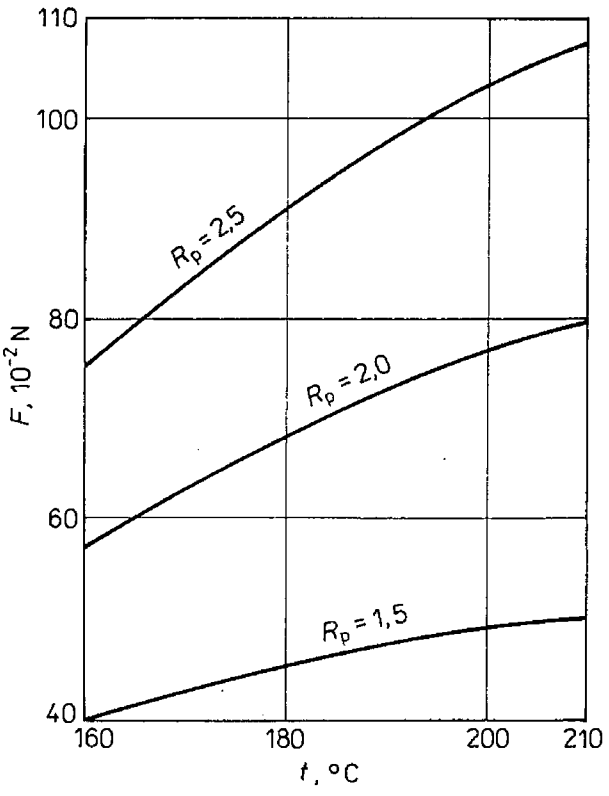
Interesujący, z inżynierskiego punktu widzenia, jest taki stopień rozdmuchania, przy którym osiąga się jednakowy skurcz w kierunku wzdłużnym i poprzecznym. Wystąpi on wówczas, gdy $R_w = R_p$, a więc jeżeli

$$\frac{g_0}{g_1}\frac{d}{D} = \frac{D}{d} \tag{5.37}$$

Przyjmując na przykład $g_0 = 0{,}7$ mm oraz $g_1 = 54$ µm

$$\frac{D}{d} = \sqrt{\frac{0{,}7}{0{,}054}} = 3{,}6$$

co oznacza, że przy stosunku $D/d = 3{,}6$ skurcz folii w obu kierunkach będzie jednakowy.



Rys. 5.52. Zależność wytrzymałości F na uderzenia za pomocą spadającego grota (według PN-72/C-89096) od temperatury t folii PE-LD o grubości 20 µm opuszczającej dyszę głowicy wytłaczarskiej dla różnych stopni rozdmuchania R_p [5.141]

Właściwości folii, z których zazwyczaj najważniejsze są mechaniczne i optyczne, zależą przede wszystkim od: temperatury folii w chwili opuszczania dyszy głowicy (rys. 5.52), stopnia rozciągania, stopnia rozdmuchania i grubości folii [5.22, 5.141], jak również od warunków starzenia [5.113]. Sprawność energetyczna wytłaczania z rozdmuchiwaniem jest oceniana jako stosunkowo mała [5.108]. Wytłaczanie z rozdmuchiwaniem swobodnym pozwala też na otrzymywanie folii porowatej, ale wymaga to pokonania wielu specyficznych trudności. Na przykład w odniesieniu do PS problemy te zostały rozwiązane w Warszawskiej Fabryce Tworzyw Sztucznych „Pollena" już w 1974 r. [5.21].

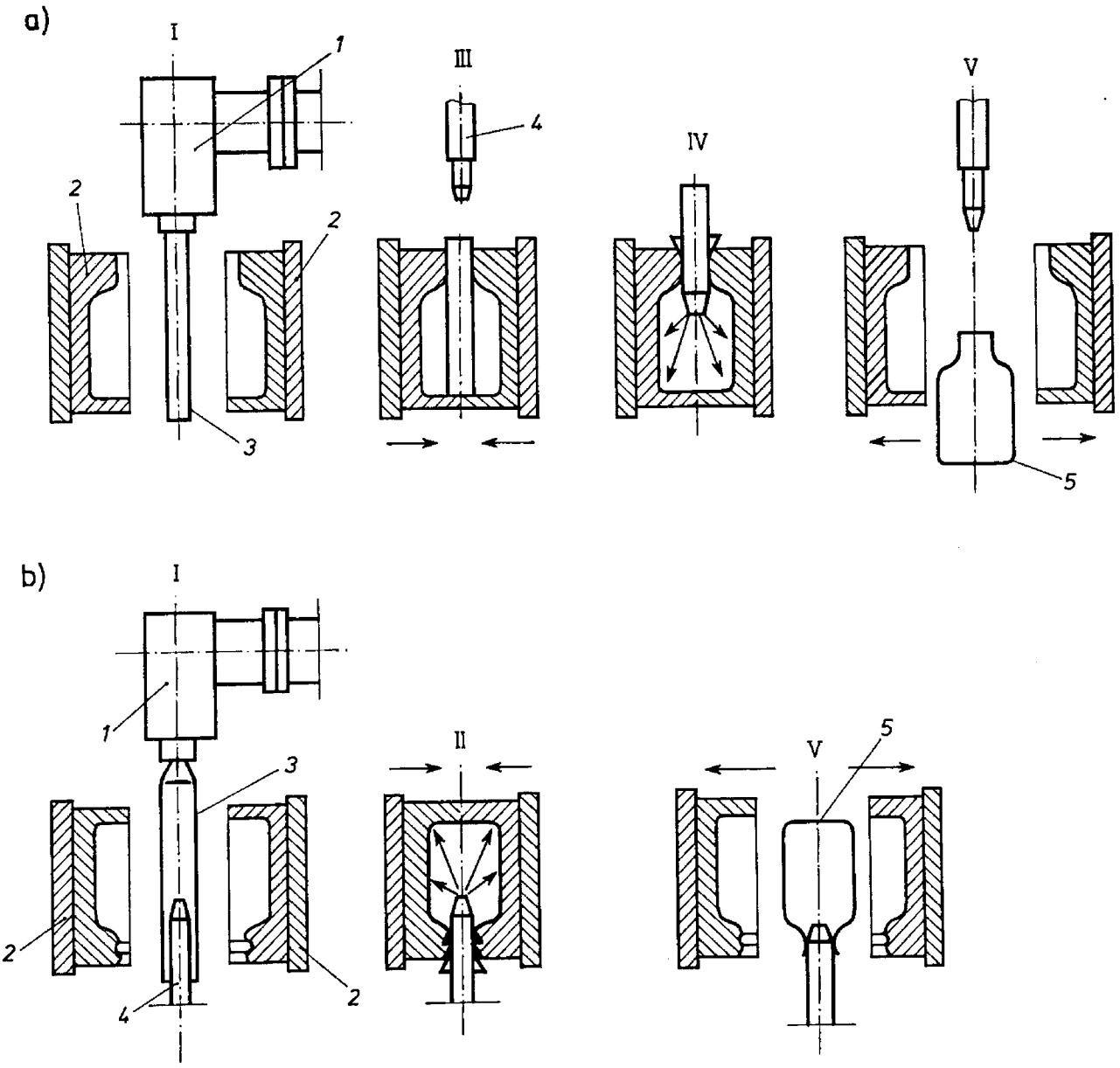
5.5.3. Wytłaczanie z rozdmuchiwaniem w formie

Proces technologiczny wytłaczania z rozdmuchiwaniem może przebiegać przy ograniczeniu mechanicznym procesu rozdmuchiwania i w tym przypadku nazywa się nieswobodnym — w formie, a w jego rezultacie otrzymuje się przede wszystkim pojemniki z tworzyw termoplastycznych do napojów, środków spożywczych, leków, chemikaliów i kosmetyków, na ogół poddawane następnie już tylko procesowi drukowania, jak również wytwory cienkościenne wewnątrz puste, zwane wydmuszkami, np. zabawki. Do samego procesu rozdmuchiwania w formie jest zbliżony w istocie fizycznej proces rozciągania rozdmuchowego.

Proces technologiczny *wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie* odbywa się na stanowiskach technologicznych. Stanowisko tworzą: wytłaczarka z głowicą kątową (krzyżówką), układ odcinająco-podający, układ formy rozdmuchowej oraz urządzenie do odbierania i ewentualnie orientowania pojemników. Wytłaczanie jest procesem ciągłym, natomiast następujące po nim procesy są cykliczne, zatem cały proces wytłaczania z rozdmuchiwaniem jest traktowany jako cykliczny.

W tradycyjnym jednoetapowym procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie głowicę opuszcza wąż tworzywa w stanie plastycznym, który jest wprowadzany do gniazda formy rozdmuchowej. W obszarze szyjki i dna pojemnika jest zgrzewany oraz odcinany podczas zamykania formy, a po jej zamknięciu rozdmuchiwany, aż do przyjęcia kształtu i wymiarów gniazda formującego, odpowiadających kształtowi i wymiarom pojemnika. Zgrzewanie i odcinanie węża [5.5, 5.56] następuje wskutek specjalnie ukształtowanych elementów na powierzchni podziału formy (p. 5.6.1). Tworzywo zostaje następnie w formie zestalone, po czym formę się otwiera, a pojemnik usuwa z gniazda. W czasie rozdmuchiwania zachodzi rozciąganie w kierunku poprzecznym oraz w mniejszym stopniu w kierunku wzdłużnym plastycznego tworzywa, ale orientacja molekularna (dwuosiowa) jest zazwyczaj mała. Istnieją dwie podstawowe odmiany tego procesu, a mianowicie: wytłaczanie z rozdmuchiwaniem od góry i od dołu (rys. 5.53). W przypadku pojemników o mniejszej pojemności przyjęło się wytłaczanie z rozdmuchiwaniem od góry [5.68], a do pojemników o większej pojemności — od dołu.

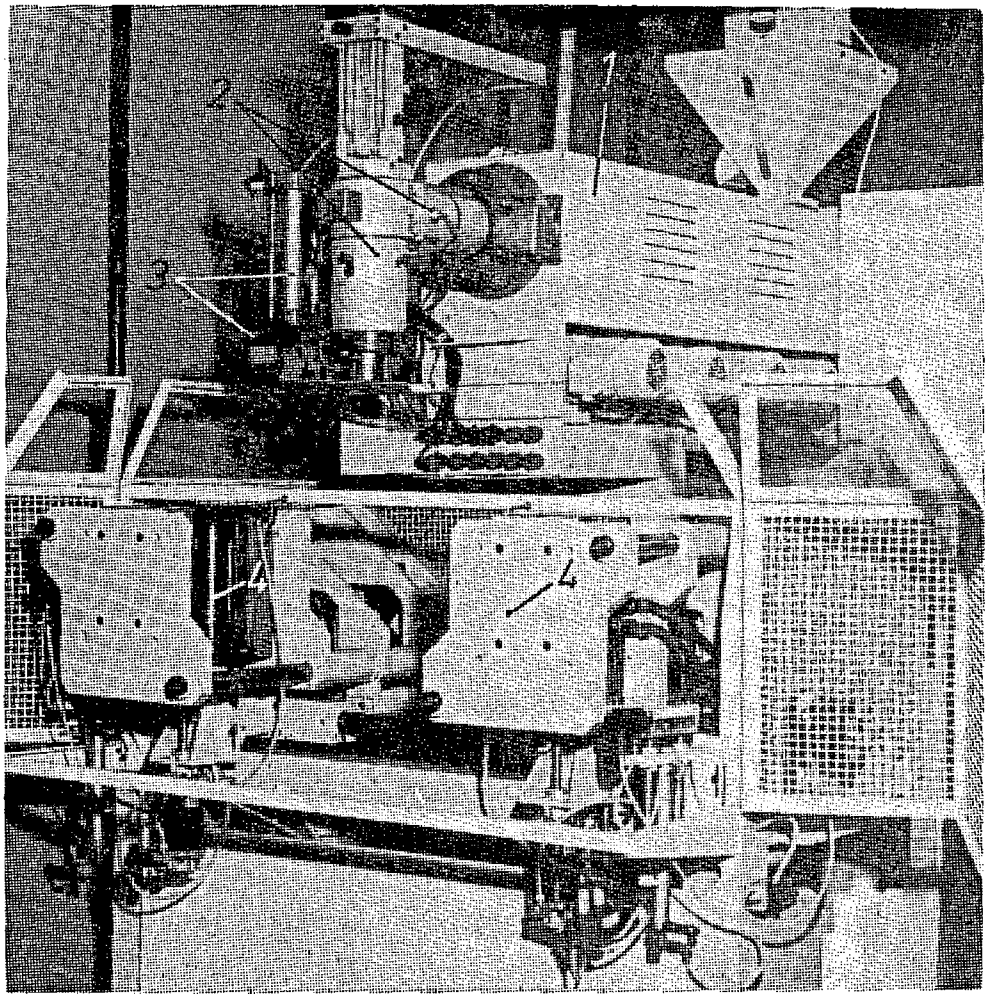
Znanych jest kilka rozwiązań jednoetapowego wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie; jedno z nich jest realizowane na stanowisku technologicznym pokazanym na



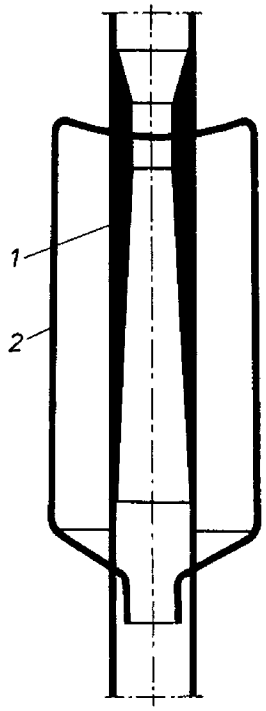
Rys. 5.53. Podstawowe odmiany tradycyjnego wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie: a) od góry, b) od dołu; I — podawanie węża tworzywa, II — zamknięcie formy, odcięcie węża i rozdmuchanie, III — zamknięcie formy i odcięcie węża, IV — wbicie trzpienia rozdmuchowego i rozdmuchanie, V — otwarcie formy i usunięcie pojemnika, *1* — głowica kątowa (krzyżowa), *2* — podzespoły ruchome formy rozdmuchowej, *3* — wąż tworzywa, *4* — trzpień rozdmuchujący, *5* — pojemnik

rys. 5.54. Stanowisko zawiera dwie formy rozdmuchowe wykonujące w cyklu procesu poziomy ruch postępowo-zwrotny. Gdy w jednej formie zachodzą fazy I i II (rys. 5.53b), to w drugiej faza V i odwrotnie. Ciśnienie powietrza rozdmuchującego jest rzędu 0,6 MPa.

Z wielu specyficznych zagadnień jednoetapowego wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie na podkreślenie zasługuje *regulacja grubości węża* tworzywa opuszczającego dyszę głowicy. Otóż w celu zapewnienia jednakowej grubości ścianki pojemnika, wąż musi mieć grubszą ściankę tam, gdzie następuje większe rozciąganie w kierunku poprzecznym przy uwzględnieniu rozciągania w kierunku wzdłużnym, głównie pod wpływem ciężaru własnego [5.126]. Pokazano to schematycznie na rys. 5.55. Regulację

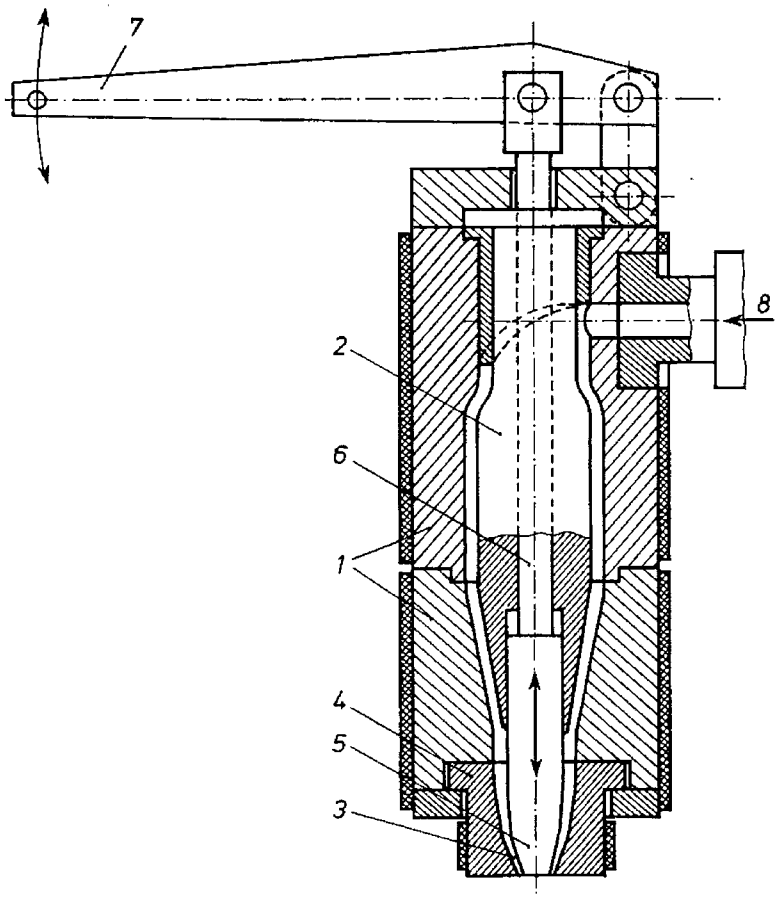


Rys. 5.54. Wygląd ogólny stanowiska technologicznego wytłaczania z rozdmuchiwaniem od dołu o nazwie ABW, do butelek PE-LD o pojemności 250÷1000 cm^3 i wydajności 450÷100 sztuk/h: *1* — wytłaczarka, *2* — głowica wytłaczarska kątowa, *3* — układ odcinająco-podający, *4* — układ formy rozdmuchowej (OBR Metalchem w Toruniu)



Rys. 5.55. Przebieg zmian grubości węża (*1*) i grubości ścian pojemnika (*2*)

tę przeprowadza się automatycznie poprzez odpowiedni ruch postępowo-zwrotny stożkowego rdzenia dyszy głowicy wytłaczarskiej (rys. 5.56).



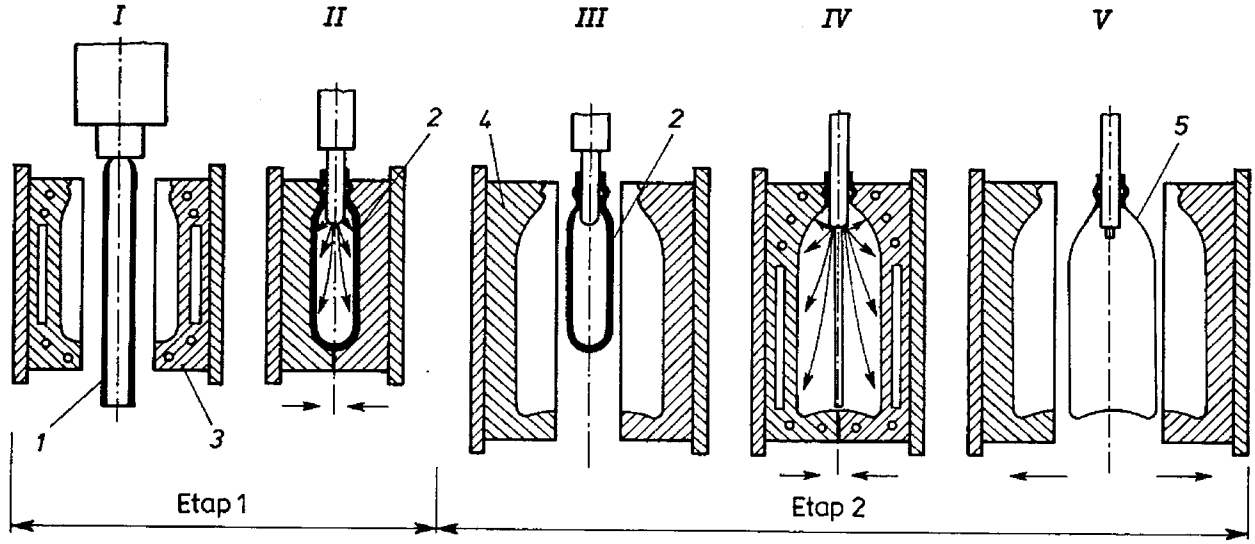
Rys. 5.56. Schemat głowicy kątowej z regulacją szerokości dyszy pierścieniowej: *1* — korpus głowicy, *2* — korpus rdzenia, *3* — dysza, *4* — końcówka dyszy, *5* — rdzeń z końcówką stożkową, *6* — trzpień rdzenia, *7* — ramię sprzężone z mechanizmem wymuszającym ruch przenoszony na rdzeń, *8* — kierunek przepływu tworzywa z wytłaczarki

Podstawową wadą tego wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie jest na ogół mała orientacja molekularna tworzywa, co w celu zapewnienia potrzebnej jakości pojemnika powoduje konieczność stosowania ścianek o stosunkowo dużej grubości, a więc użycia dużej ilości tworzywa. Wady tej nie ma odmiana wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie zwana *procesem dwuetapowym*. Istota jej polega na (rys. 5.57):

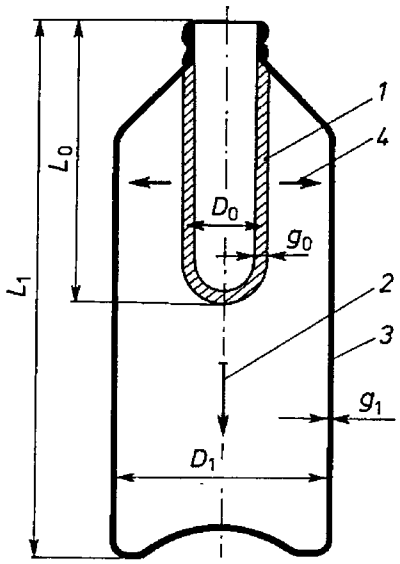
— wytłaczaniu z rozdmuchiwaniem węża tworzywa — podobnie jak w odmianie tradycyjnej, ale w celu otrzymania nie gotowego pojemnika, lecz kształtki wstępnej, zwanej *prepojemnikiem*, o mniejszych wymiarach i grubszej ściance; formowanie wstępne — etap pierwszy;

— ustaleniu temperatury kształtki wstępnej i następnie jej rozdmuchaniu z ewentualnym wzdłużnym rozciąganiem mechanicznym w celu otrzymania gotowego pojemnika; formowanie zasadnicze — etap drugi.

Oba wymienione etapy mogą być realizowane na jednym lub dwóch stanowiskach technologicznych. Forma służąca do otrzymywania prepojemnika nosi nazwę *preformy rozdmuchowej*.



Rys. 5.57. Schemat dwuetapowego procesu wytłaczania z rozdmuchiwaniem: *I* ÷ *V* — poszczególne fazy procesu, *I* i *II* — etap pierwszy, *III*, *IV* i *V* — etap drugi; *1* — wąż tworzywa, *2* — kształtka wstępna, *3* — preforma rozdmuchowa, *4* — forma rozdmuchowa, *5* — pojemnik [5.24, 5.99]



Rys. 5.58. Kształtka wstępna i pojemnik z niej otrzymany: *1* — kształtka wstępna, *2* — kierunek rozciągania wzdłużnego, *3* — pojemnik, *4* — kierunek rozciągania poprzecznego

Dwuetapowy proces wytłaczania z rozdmuchiwaniem, zwłaszcza jako drugi etap, jest charakteryzowany następującymi wielkościami (rys. 5.58):

— stopniem rozciągania w kierunku wzdłużnym

$$R_w = \frac{L_1}{L_0} \tag{5.38}$$

— stopniem rozciągania w kierunku poprzecznym

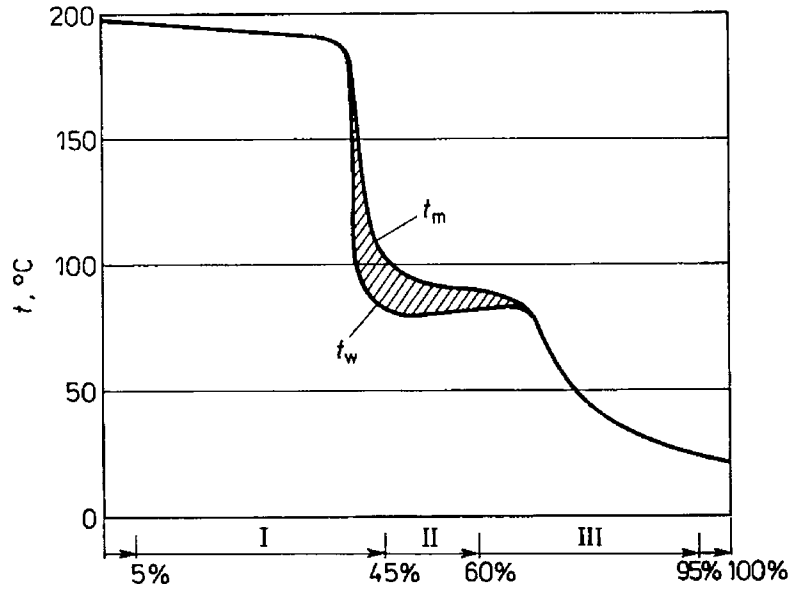
$$R_p = \frac{D_1}{D_0} \tag{5.39}$$

— stopniem orientacji makrocząsteczkowej definiowanym umownie jako stosunek

$$R_m = \frac{g_1}{g_0} \tag{5.40}$$

mającym dość zróżnicowane wartości; np. dla PVC może on wynosić 1:4, a dla PP od 1:6 do 1:15.

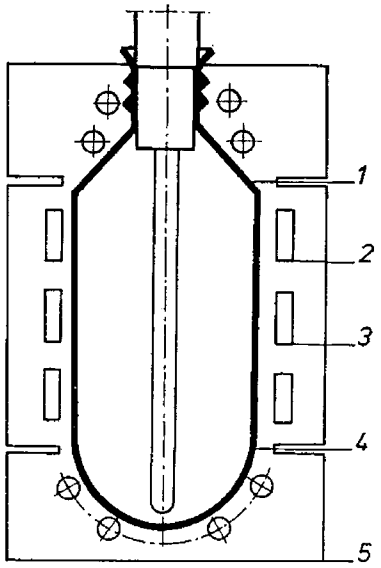
Bardzo ważnym problemem jest ustalenie temperatury prepojemnika i rozpoczęcie formowania zasadniczego z chwilą wykształcenia się krystalitów, gdyż dopiero w tworzywie o takim stanie zachodzi dwuosiowa orientacja molekularna, powodująca polepszenie jakości pojemników. Na ogół kształtkę wstępną należy ochładzać, ale są również przypadki, gdy trzeba ją nagrzewać. Temperatura kształtki w chwili rozpoczęcia formowania zasadniczego powinna wynosić dla PVC 90÷110°C [5.25]. Temperatura tworzywa przetwarzanego zmienia się w sposób dość złożony (rys. 5.59).



Rys. 5.59. Zależność temperatury t tworzywa od czasu procesu dwuetapowego wytłaczania z rozdmuchiwaniem na stanowisku technologicznym firmy Bekum (Niemcy): I — formowanie wstępne, II — ustalanie temperatury ścianki kształtownika wstępnego, III — formowanie zasadnicze, t_m — temperatura wewnątrz ścianki, t_w — temperatura na wierzchu ścianki [5.1, 5.122]

Wąż tworzywa opuszczający dyszę głowicy jest jednakowej grubości, a równomierną grubość ścianek pojemnika zapewnia się poprzez zmienną odkształcalność poszczególnych stref, wydzielonych wzdłuż długości pojemnika, powodowaną różną ich temperaturą. Na rysunku 5.60 pokazano przykład rozmieszczenia stref pojemnika-butelki. Najniższa temperatura ścianki jest w strefie *1* oraz *5*, tj. w strefie szyjki, gdzie musi być zachowana duża grubość ścianki do poprawnego kontaktu z nakrętką w czasie użytkowania oraz w strefie dna, gdzie rozciąganie jest najintensywniejsze, ale gdzie temperatura musi być na tyle wysoka, aby nastąpiło zgrzewanie dna powstającego węża o kołowym przekroju poprzecznym. Temperatura w strefach *2*, *3* i *4* powinna być prawie jednakowa, jednakowe bowiem są tu odkształcenia tworzywa i taka sama grubość ścianki pojemnika.

Kształtka wstępna musi być również wytworzona z węża otrzymanego w procesie współwytłaczania. Dwuetapowe współwytłaczanie z rozdmuchiwaniem jest jeszcze mało rozpowszechnione, gdyż stwarza specyficzne problemy [5.28, 5.66]. Uzyskuje się jednak interesujące rezultaty, np. można wytwarzać pojemniki 30-litrowe trójwar-



Rys. 5.60. Przykład rozmieszczenia stref cieplnych wzdłuż długości pojemnika; oznaczenia w tekście [5.24]

stwowe: warstwa wewnętrzna z PE regenerowanego (80% grubości), warstwy zewnętrzne z PE pierwotnego, odpowiednio barwionego [5.95].

Ważniejsze zalety dwuetapowych procesów wytłaczania i współwytłaczania z rozdmuchiwaniem w porównaniu z tradycyjnymi procesami są następujące: zmniejszenie masy porównywalnego pojemnika o 15÷25%, zwiększenie odporności na spadanie pojemnika o prawie 100%, zwiększenie odporności na podciśnienie w pojemniku o około 18%, zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej i polepszenie właściwości barierowych [5.1, 5.25].

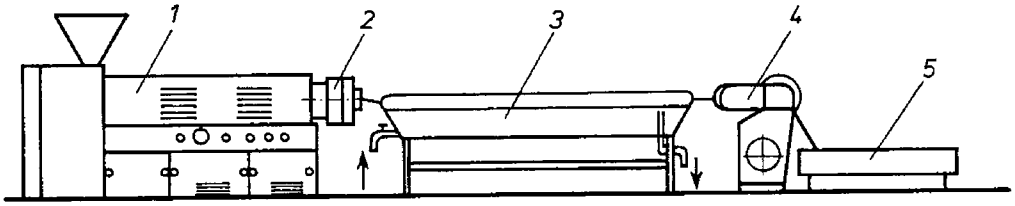
Ochładzanie pojemników można skrócić aż o 30÷40% i więcej, a poprzez to zwiększyć wydajność stanowiska technologicznego, wskutek stosowania jako czynnika rozdmuchującego i chłodzącego azotu w stanie ciekłym (77 K) [5.37].

Pewną odmianę wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie stanowi rozwiązanie umożliwiające wypełnianie gniazda formy rozdmuchowej nie pod wpływem ciśnienia gazu, przede wszystkim powietrza, lecz ciśnienia cieczy. Ciecz rozprężająca, np. ciecz sterylna lub woda destylowana pod ciśnieniem 3400 Pa [5.79], pozostaje w pojemnikach-ampułkach [5.132]. Tego rodzaju proces można nazywać *wytłaczaniem z napełnianiem.*

5.5.4. Wytłaczanie z granulowaniem

Wytłaczanie z granulowaniem stanowi połączenie w jeden proces technologiczny metody przetwórstwa fizyczno-chemicznego II rodzaju — wytłaczania z metodą obróbki skrawaniem — granulowaniem. Wytłaczanie z granulowaniem ma znaczenie szczególne. Większość tworzyw termoplastycznych i niektóre tworzywa utwardzalne, jako materiały wejściowe do procesów przetwórstwa, są w stanie stałym i mają postać granulek, ale z procesu polimeryzacji wychodzą w postaci proszku, muszą więc w ostatniej fazie wytwarzania zostać zgranulowane. Procesy technologiczne wytłaczania z granulowaniem przebiegają w liniach technologicznych, które dzielą się na linie do wytłaczania z granulowaniem na zimno (w stanie ciekłym) i na linie do wytłaczania z granulowaniem na ciepło (w stanie plastycznym).

Na rysunku 5.61 jest pokazana linia technologiczna wytłaczania z granulowaniem na zimno do tworzyw termoplastycznych. Składa się ona z następujących elementów składowych: wytłaczarki jedno- lub dwuślimakowej (*1*), zaopatrywanej tworzywem w postaci proszku, głowicy wytłaczarskiej (*2*), urządzenia chłodzącego (*3*), maszyny do granulowania — granulatora (*4*) i segregatora wibracyjnego (*5*). W głowicy

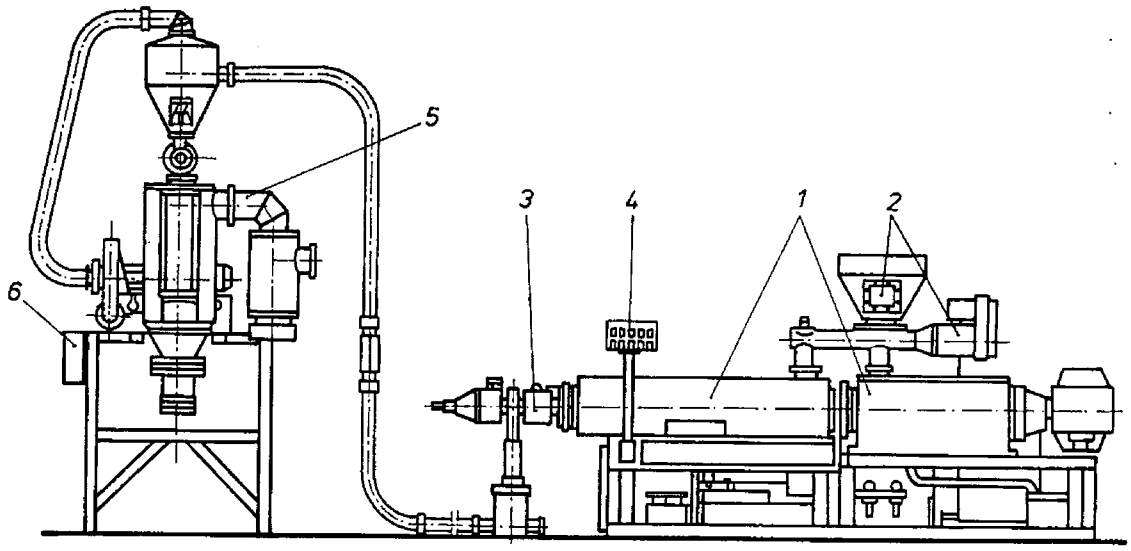


Rys. 5.61. Schemat linii technologicznej wytłaczania z granulowaniem na zimno tworzyw termoplastycznych: oznaczenia w tekście

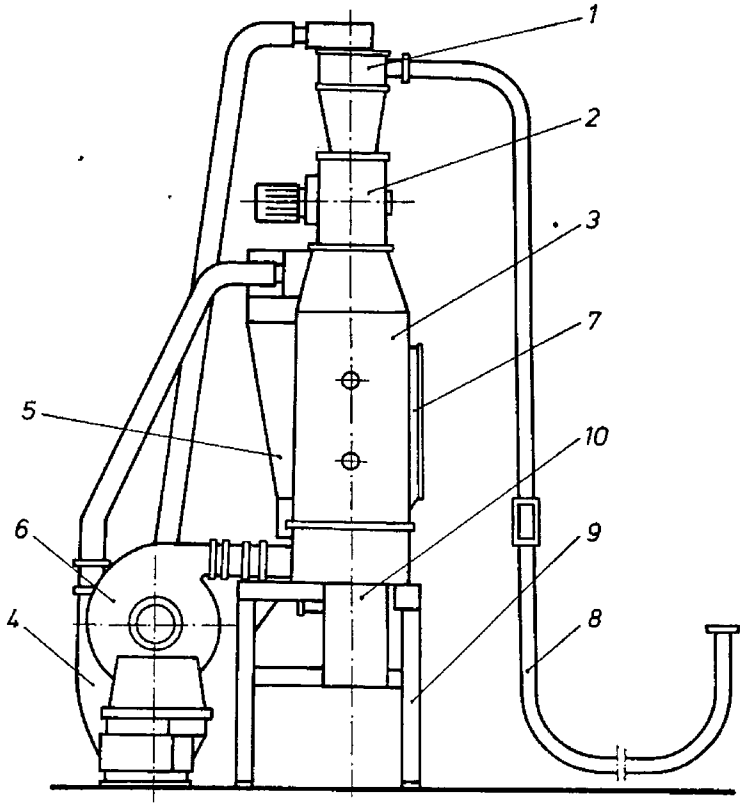
znajduje się element oporowy zawierający na ogół od kilkunastu nawet do kilkudziesięciu dysz kołowych o średnicy kilku milimetrów, np. 3 lub 5 mm, umieszczonych w rzędzie, nadających wytłoczynie kształt żyłek. Żyłki w stanie plastycznym wprowadza się niezwłocznie po opuszczeniu dysz do urządzenia chłodzącego, które bardzo często stanowi wanna z przepływającą wodą chłodzącą. Żyłki zanurzone w wodzie przesuwają się w wannie, podpierane wałkami z rowkami obwodowymi, gdzie są prowadzone. Mogą być również podpierane płytami z rowkami prowadzącymi. Stosuje się także urządzenia chłodzące z nadmuchem powietrza chłodzącego na żyłki lub urządzenia wodno-powietrzne; ponieważ w tych przypadkach czas chłodzenia żyłek jest dłuższy, wydłuża się cała linia [5.138]. Głównym elementem segregatora wibracyjnego jest zazwyczaj sito wykonujące ruch drgający, które przesiewając całość granulatu kieruje podziarno i nadziarno do odrębnych zasobników.

Wytłaczanie z granulowaniem na zimno tworzyw utwardzalnych polega na wytłoczeniu za pomocą wytłaczarki bez głowicy, jedno- lub dwuślimakowej, zaopatrywanej tworzywem w postaci proszku, elementów tworzywa bezpośrednio do urządzenia chłodzącego. Przedwczesnemu utwardzeniu tworzywa zapobiega stosowanie obniżonej temperatury wytłaczania, np. podczas wytłaczania tworzywa melaminowego temperatura ścianki cylindra wynosi najwyżej $65 \div 85°C$, zależnie od gatunku tworzywa [5.34]. Po ochłodzeniu odcinki tworzywa poddaje się procesowi granulowania na zimno i następnie granulat kieruje się do segregatora wibracyjnego, podobnie jak w przypadku tworzyw termoplastycznych.

Linia technologiczna wytłaczania z granulowaniem na ciepło tworzyw termoplastycznych jest pokazana na rys. 5.62. Składa się ona przede wszystkim z: wytłaczarki jedno- lub dwuślimakowej (*1*), zaopatrywanej tworzywem w postaci proszku, głowicy granulacyjnej (*3*) i urządzenia chłodzącego (*5*). Głowica granulacyjna stanowi połączenie konstrukcyjne głowicy wytłaczarskiej ogrzewanej grzejnikami elektrycznymi (np. pierścieniowymi) bądź chłodzonej wodą (głównie połączenie odpowiednich kanałów przepływowych) z granulatorem do obrotowego cięcia nieswobodnego żyłek tworzywa plastycznego. Głowice mogą być chłodzone, bezpośrednio w strefie cięcia, powietrzem lub wodą.



Rys. 5.62. Linia technologiczna wytłaczania z granulowaniem na ciepło tworzyw termoplastycznych LG 14/8-700: *1* — wytłaczarka, *2* — dozownik poziomy, *3* — głowica granulacyjna, *4* — pulpit sterowniczy wytłaczarki i głowicy, *5* — urządzenie chłodzące, *6* — pulpit sterowniczy urządzenia chłodzącego (OBR Metalchem w Toruniu)

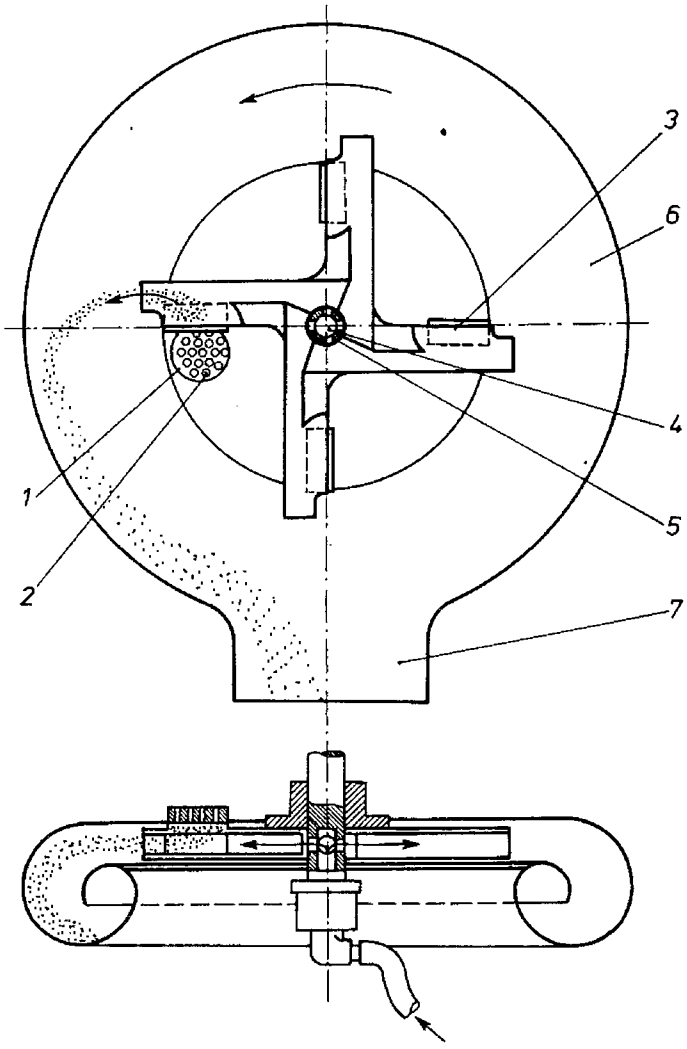


Rys. 5.63. Urządzenie chłodzące granulat SG-700: *1* — cyklon, *2* — śluza obrotowa, *3* — zbiornik chłodzący, *4* — wentylator transportujący, *5* — cyklon odpylający, *6* — wentylator chłodzący, *7* — wziernik, *8* — przewód pneumatyczny łączący głowicę granulacyjną z urządzeniem chłodzącym, *9* — podstawa urządzenia, *10* — pulpit sterowniczy (OBR Metalchem w Toruniu)

W przypadku wytłaczania z granulowaniem na ciepło z zastosowaniem powietrza jako czynnika chłodzącego, bezpośrednio po procesie granulowania, nadal jeszcze ciepły granulat jest transportowany pneumatycznie przewodami do urządzenia chłodzącego, gdzie ulega ochłodzeniu do temperatury umożliwiającej swobodne jego pakowanie, transport i magazynowanie.

Urządzenie chłodzące (rys. 5.63) zawiera cyklon (*1*) układu transportującego, do którego jest doprowadzany — z wykorzystaniem ciśnienia powietrza chłodzącego w strefie cięcia — ciepły granulat. W cyklonie granulat oddziela się od strumienia powietrza transportującego, ochładzając się wstępnie, i jest przesypywany przez śluzę obrotową (*2*) do zbiornika chłodzącego (*3*). Oddzielone od granulatu powietrze transportujące przepływa przez wentylator transportujący (*4*) do cyklonu odpylającego (*5*) i dalej do atmosfery. Stosowanie śluzy jest konieczne, gdyż uniemożliwia przepływ powietrza znajdującego się pod ciśnieniem ze zbiornika (*3*) do cyklonu (*1*). Z wentylatora (*6*) układu chłodzącego powietrze jest tłoczone przez sito i złoże granulatu w zbiorniku (*3*), ochładzając ostatecznie granulat. Powietrze to przepływa dalej do cyklonu odpylającego (*5*) i następnie do atmosfery. Gdy złoże granulatu w zbiorniku (*3*) osiągnie przewidzianą górną wysokość widoczną we wzierniku (*7*), granulat zostaje wsypany do worka, po otwarciu pokrywy spustowej *workownicy*. Znane są również inne rozwiązania urządzenia chłodzącego [5.86].

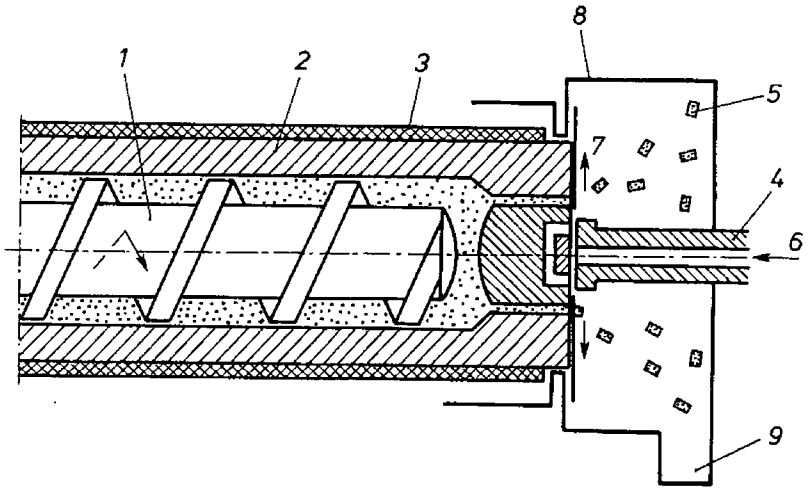
W przypadku wytłaczania z granulowaniem na ciepło z użyciem wody jako czynnika chłodzącego, głowica granulacyjna, oprócz podanych już funkcji głowicy wytłaczarskiej i granulatora, spełnia jeszcze jedną funkcję, a mianowicie urządzenia chłodzącego. Na rysunku 5.64 przedstawiono schemat jednego z rozwiązań głowicy granulacyjnej. Głowica ta zawiera płytę oporową (*1*) z dyszami (*2*), umieszczoną mimośrodowo względem wirnika tnącego (*3*). Woda doprowadzona pod ciśnieniem



Rys. 5.64. Schemat głowicy granulacyjnej stosowanej podczas wytłaczania z granulowaniem na ciepło tworzyw termoplastycznych z użyciem wody [5.85]; oznaczenia w tekście

przez otwór (*4*) w wale (*5*) wirnika przepływa do ramion wirnika. Otrzymany w rezultacie cięcia granulat jest spłukiwany do obudowy pierścieniowej (*6*), skąd wraz z wodą opuszcza obudowę wylotem (*7*). Woda jest oddzielana od granulatu, np. odcedzana lub odwirowana, a granulat często poddawany suszeniu.

Można także prowadzić proces wytłaczania z granulowaniem na ciepło, w którym cięcie plastycznego tworzywa odbywa się za pomocą strumienia wody. Wytłaczane tworzywo poddaje się procesowi cięcia przez strumień wody wypływający pod dużym ciśnieniem z dyszy, w przybliżeniu prostopadle do kierunku przepływu tworzywa w kanałach (rys. 5.65). Dalsze postępowanie z mieszaniną granulatu i wody jest identyczne jak poprzednio.

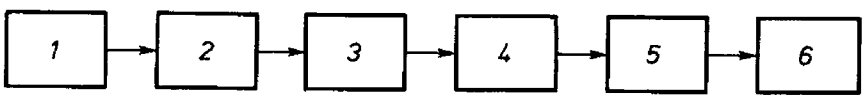


Rys. 5.65. Schemat wytłaczania z granulowaniem na ciepło z użyciem wody jako czynnika powodującego proces cięcia, chłodzenia i transportowania: *1* — ślimak, *2* — cylinder, *3* — grzejniki elektryczne, *4* — przewód doprowadzający wodę pod ciśnieniem, *5* — granulki tworzywa, *6* — kierunek przepływu wody doprowadzającej, *7* — kierunek ruchu wody powodującej cięcie, *8* — obudowa, *9* — wylot

5.5.5. Wytłaczanie z wulkanizowaniem

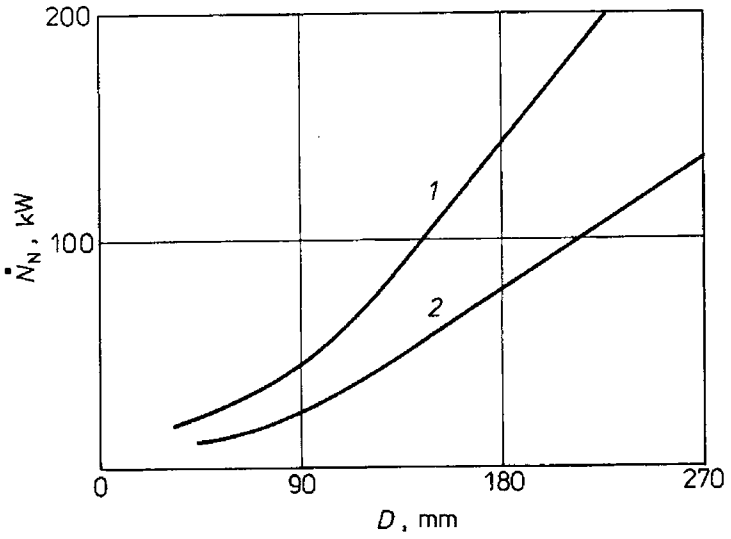
Proces technologiczny wytłaczania z wulkanizowaniem odnosi się do elastomerów utwardzalnych o największym znaczeniu, czyli gumy, i odbywa się zazwyczaj w liniach technologicznych. Budowa i charakterystyka linii są bardzo zróżnicowane. Otrzymuje się głównie kształtowniki, zwane również w literaturze [5.40] *sznurami profilowymi*. Szczególne znaczenie ma otrzymywanie węży, dętek i bieżników opon pojazdów samochodowych.

Pospolite kształtowniki z gumy litej i porowatej otrzymuje się w liniach technologicznych obejmujących (rys. 5.66): przygotowanie mieszanki gumowej (elasto-



Rys. 5.66. Procesy zachodzące w linii technologicznej wytłaczania kształtowników z gumy: *1* — przygotowanie mieszanki gumowej, *2* — wytłaczanie, *3* — wulkanizacja, *4* — oczyszczanie, *5* — ochładzanie, *6* — odbieranie i nawijanie

merowej), wytłaczanie, wulkanizowanie, oczyszczanie, ochładzanie, odbieranie i nawijanie. Mieszanki gumowe przygotowuje się poprzez mieszanie, np. za pomocą walcowania, w danych warunkach i w określonych proporcjach następujących składników: kauczuk lub kauczuki różnych gatunków, środek wulkanizujący, różne stabilizatory, napełniacz, plastyfikator, przyspieszacz, środek barwiący, regenerat gumowy i inne. W procesie wytłaczania zachodzi ostateczne mieszanie składników mieszanki gumowej, jej uplastycznianie i nadanie wytłoczynie żądanych kształtów i wymiarów przekroju poprzecznego. Można stosować wytłaczarki jednoślimakowe bądź rzadziej dwuślimakowe, ale z odgazowaniem. Niedostateczne odgazowanie podczas późniejszego wulkanizowania bezciśnieniowego powoduje powstawanie porów w wytłoczynie. W wytłaczarkach jednoślimakowych zaopatrywanych mieszanką gumową nagrzaną wstępnie stosunek $L/D = (3 \div 6)\ D$, a w zaopatrywanych mieszanką bez wstępnego nagrzania $L/D = (10 \div 20)\ D$. Wytłaczarki te różnią się też mocą całkowitą: mocą większą charakteryzują się wytłaczarki do mieszanki bez wstępnego nagrzania, przy czym różnica mocy rośnie z powiększaniem się średnicy ślimaka (rys. 5.67). Różnica ta wynika przede wszystkim z potrzeby dostarczenia



Rys. 5.67. Zależność mocy całkowitej $\dot{N}_N$ (napędu i ogrzewania) od średnicy D ślimaka wytłaczarek jednoślimakowych do gumy: *1* — zaopatrywanie mieszanką bez wstępnego nagrzania, *2* — zaopatrywanie mieszanką wstępnie nagrzaną [5.40]

większej energii do procesu wytłaczania, gdy tworzywo wprowadzane do niego nie jest wstępnie nagrzane. Stosuje się również współwytłaczanie, np. części bieżnej protektora (jeden gatunek gumy) oraz warstwy podprotektorowej i boków opony (drugi gatunek gumy). Proces wulkanizowania bezciśnieniowego odbywa się w wannie lub komorze wulkanizacyjnej [5.40]:

— w złożu fluidalnym; złoże tworzą szklane kuleczki lub piasek, zawieszone w strumieniu gorącego powietrza o temperaturze $180 \div 240$°C w zależności od rodzaju mieszanki;

— w stopionych solach o podobnym zakresie temperatury;

— w polu mikrofalowym; czas wulkanizowania skraca się nawet do kilku sekund.

Celem oczyszczania jest usunięcie pozostałości czynnika wulkanizującego, przywartych do powierzchni kształtownika, np. wykrystalizowanych soli. Zachodzi ono za pomocą gorącej wody w specjalnych płuczkach lub w strumieniu gorącego sprężonego powietrza. Ochładzanie przebiega w wannach z przepływającą wodą chłodzącą lub w nadmuchu powietrza chłodzącego. Ochłodzony kształtownik jest odbierany za pomocą urządzenia odbierającego walcowego (jak w p. poprzednich) i nawijany na wale urządzenia nawijającego.

Za pomocą przedstawionej linii otrzymuje się kształtowniki składające się z gumy jednego lub kilku rodzajów i o zróżnicowanej makrostrukturze. Niektóre kształtowniki, np. węże wysokociśnieniowe, przenoszą znaczne, dynamiczne i długotrwałe obciążenia i w związku z tym muszą być wzmacniane różnymi włóknami, tkaninami i drutami stalowymi. Na ogół otrzymuje sie je w liniach technologicznych o dość złożonej budowie (p. 5.5.10).

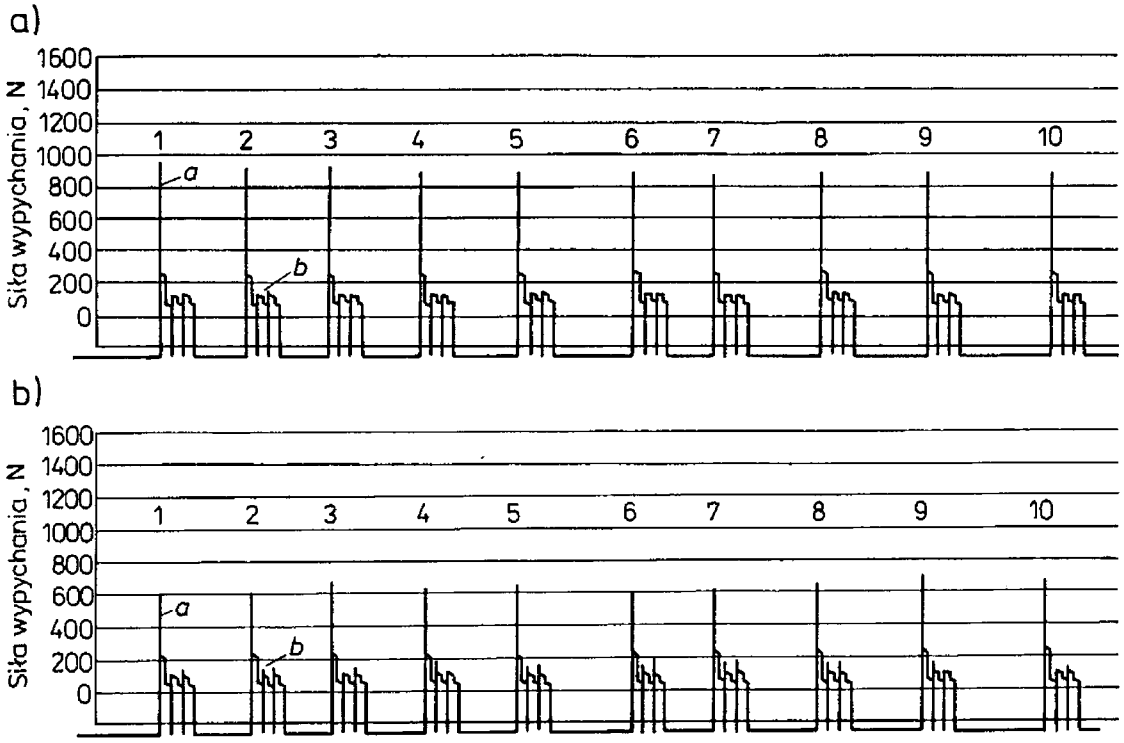
5.5.6. Wtryskiwanie wyprasek technicznych i precyzyjnych

Procesy technologiczne, w których podstawowym procesem jest wtryskiwanie, są prowadzone najczęściej na *stanowiskach technologicznych wtryskiwania.*

W każdym przypadku w celu sprawniejszego *uwalniania i wypychania wyprasek* wtryskowych z gniazd formujących stosuje się powłoki ze środków rozdzielających, którymi powleka się powierzchnie gniazd. Jako środki rozdzielające stosuje się powszechnie oleje silikonowe oraz roztwory i emulsje oparte na tych olejach, jak również rozmaite woski. Stosuje się je zwłaszcza tam, gdzie na skutek cech geometrycznych uwalnianie i wypychanie może być utrudnione, a więc np. na płaszczyznach nachylonych pod małym kątem do kierunku otwierania formy. Odnawianie powłoki odbywa się zazwyczaj po kilku cyklach wtryskiwania. Trzeba jednak zaznaczyć, że powłoki pogarszają jakość wyprasek przede wszystkim poprzez wyraźniejsze uwidocznienia miejsc łączenia strumieni tworzywa w gnieździe, zmatowienia powierzchni wyprasek i utrudnienia późniejszego drukowania, metalizowania, klejenia czy lakierowania.

Aby usunąć te niedogodności, można powlec trwale powierzchnię gniazd niklem z dodatkiem zdyspergowanego PTFE [5.23]. Powlekanie odbywa się metodą chemiczną (bezprądowo), a powłoka ma grubość rzędu 10 μm. Po kilkudziesięciu cyklach procesu wtryskiwania siła potrzebna do wypchania wypraski jest nadal znacznie mniejsza, niż gdy powierzchnia gniazda nie jest powleczona (rys. 5.68). Dobre efekty uzyskuje się również stosując powłoki azotku tytanu TiN [5.36].

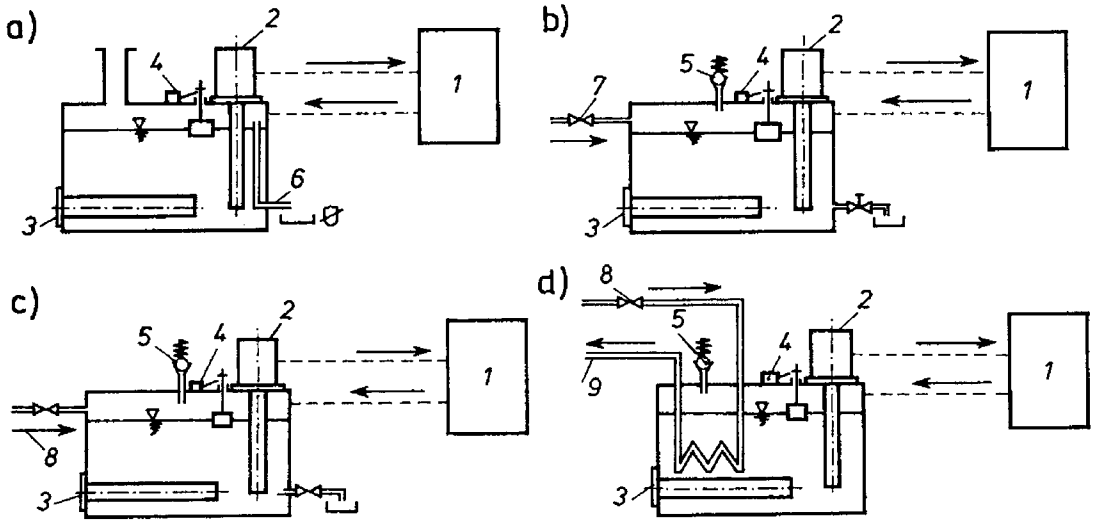
Regulacja temperatury formy jest bardzo często nieodzowna. W przypadku tworzyw termoplastycznych odbywa się ona za pomocą specjalnych regulatorów temperatury. Podawany pompą ze zbiornika regulatora czynnik chłodząco-nagrzewający przepływa przez formę i wpływając z powrotem do zbiornika trafia na czujnik termometru. Jeżeli temperatura czynnika jest niższa od nastawionej na termometrze, powoduje to przymknięcie zaworu dopływu czynnika chłodzącego zbiornik i włączenie grzejników elektrycznych, znajdujących się w zbiorniku i zanurzonych w czynniku. Gdy temperatura czynnika jest wyższa od nastawionej, następuje działanie odwrotne.



Rys. 5.68. Zmiana siły wypychania wyprasek z PS-HI między 50 i 60 cyklem procesu wtryskiwania w przypadku powierzchni gniazda niepowlekanego (a) i powlekanego Ni/PTFE (b): liczby od 1 do 10 oznaczają kolejne cykle, *a* — wykres przy wypychaniu wypraski, *b* — wykresy przy jałowym ruchu układu wypychającego

Regulatory temperatury formy bywają rozmaicie rozwiązywane; ważniejsze z tych rozwiązań przedstawione są na rys. 5.69. Na ogół regulatory są przestawne, a więc łatwo można je instalować przy wtryskarce.

Ważnym kryterium oceny efektywności procesu wtryskiwania tworzyw termoplastycznych jest *współczynnik efektywności C*, definiowany jako stosunek objętości V_w wyprasek razem z wlewkiem i ewentualnym rąbkiem do największej pojemności V_{max}



Rys. 5.69. Schematy regulatorów temperatury: a) z otwartym zbiornikiem, b) ze zbiornikiem zamkniętym — ciśnieniowy, c) ciśnieniowy z chłodzeniem bezpośrednim, d) ciśnieniowy z chłodzeniem pośrednim (zalecany do stosowania); *1* — forma, *2* — pompa, *3* — grzejniki elektryczne, *4* — wskaźnik poziomu czynnika, *5* — zawór bezpieczeństwa, *6* — przelew, *7* — zawór magnetyczny, *8* — doprowadzenie zimnej wody, *9* — odprowadzenie zimnej wody [5.116]

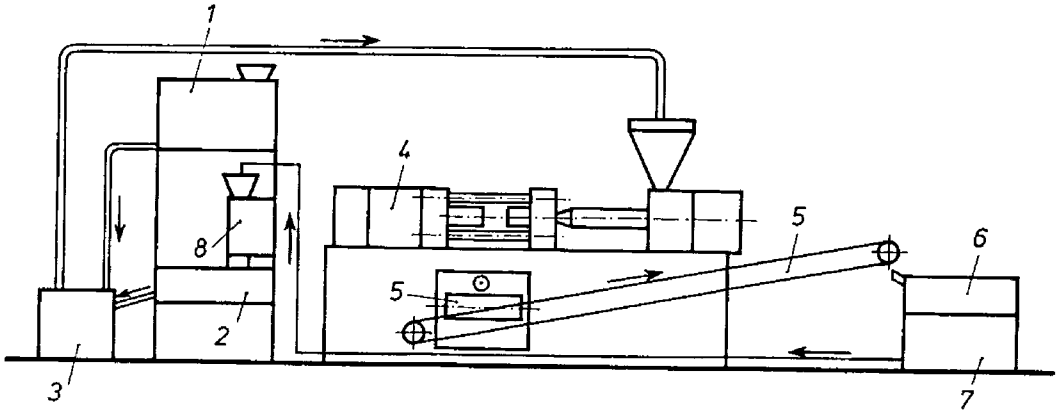
wtrysku. Istnieje dolna i górna wartość graniczna współczynnika C. Dolna wartość graniczna wynika z rozkładu cieplnego tworzywa zbyt długo przebywającego w układzie uplastyczniającym; wynosi ona na ogół $0{,}1 \div 0{,}2$ (tabl. 5.20). W przypadku wyprasek cienkościennych wartość ta może być nieco obniżona, natomiast w przypadku wyprasek grubościennych — podwyższona. Górna wartość graniczna wynika ze znacznego skurczu wypraski, zachodzącego w gnieździe, dochodzącego dla tworzyw częściowo krystalicznych do około 18%, a dla tworzyw bezpostaciowych do około 7% [5.46]; o taką ilość tworzywa musi zostać uzupełnione gniazdo podczas fazy docisku. Zatem górna wartość graniczna współczynnika C wynosi dla tworzyw częściowo krystalicznych $0{,}8 \div 0{,}85$, a dla tworzyw bezpostaciowych $0{,}9 \div 0{,}94$. Proces wtryskiwania powinno się prowadzić tak, aby $0{,}5 < C < (0{,}8 \div 0{,}9)$.

Tablica 5.20

Dolna wartość graniczna współczynnika efektywności C wtryskiwania [5.46]

Tworzywo	Wartość współczynnika C
PC	0,1
PE, PS, ABS, SAN	0,15
PVC, POM, PMMA	0,2

Na rysunku 5.70 przedstawiono przykładowo rozwiązanie stanowiska technologicznego wtryskiwania tworzyw termoplastycznych w przypadku średniej liczebności serii i przeciętnie spotykanych rozmiarów wyprasek. Stanowisko składa się

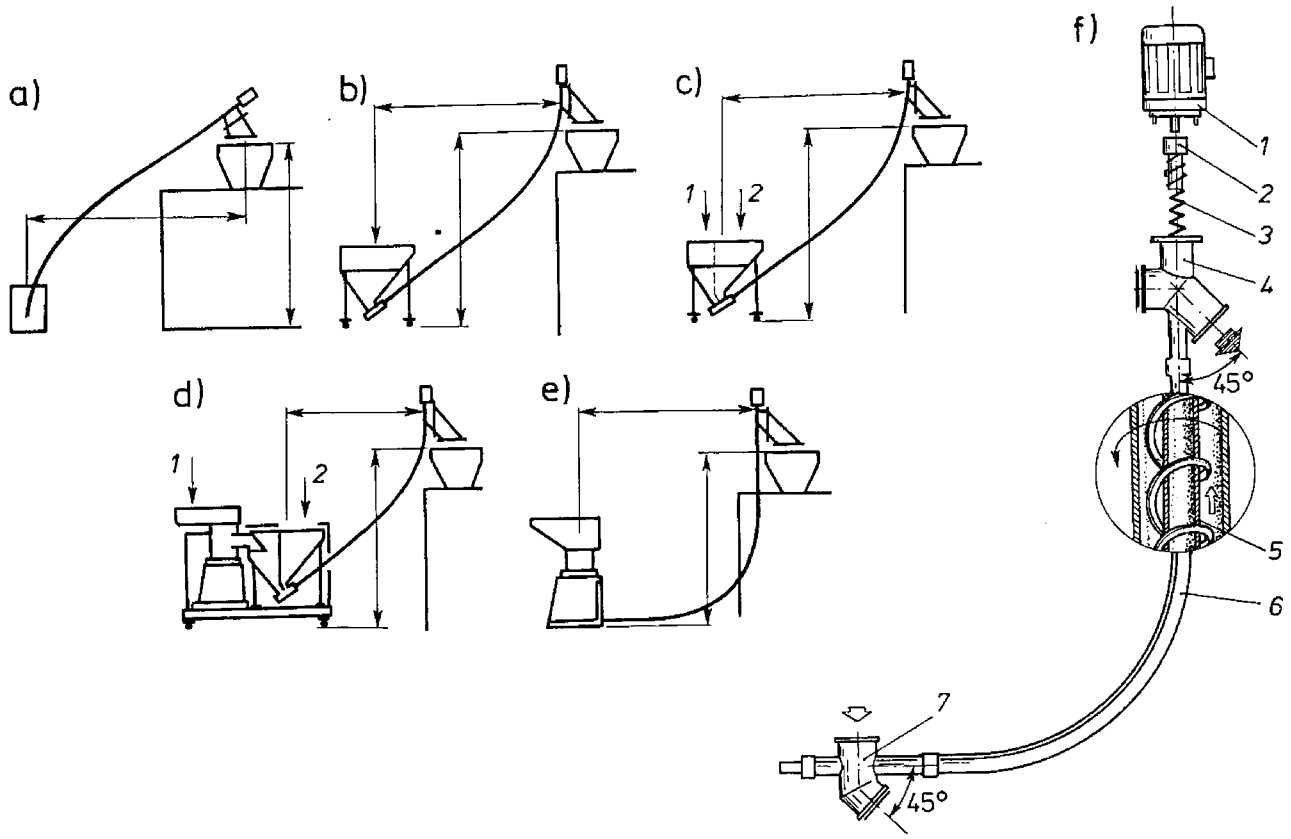


Rys. 5.70. Schemat stanowiska technologicznego wtryskiwania; oznaczenia w tekście

z: zbiornika (*1*) tworzywa wejściowego pierwotnego, tj. wytworzonego w procesie polimeryzacji, zbiornika (*2*) tworzywa wejściowego wtórnego — regenerowanego, tj. otrzymanego z odpadów wtryskowych — wlewów i ewentualnie rąbków oraz braków, urządzenia (*3*) podającego zmieszane w odpowiednich proporcjach tworzywo pierwotne i wtórne, wtryskarki (*4*), urządzenia (*5*) odbierającego wypraski z wlewkami, urządzenia (*6*) oddzielającego wypraski od odpadów wtryskowych, urządzenia (*7*) doprowadzającego odpady do rozdrabniania oraz granulatora do granulowania na zimno — młyna nożowego (*8*). Mieszanina tworzywa pierwotnego i wtórnego

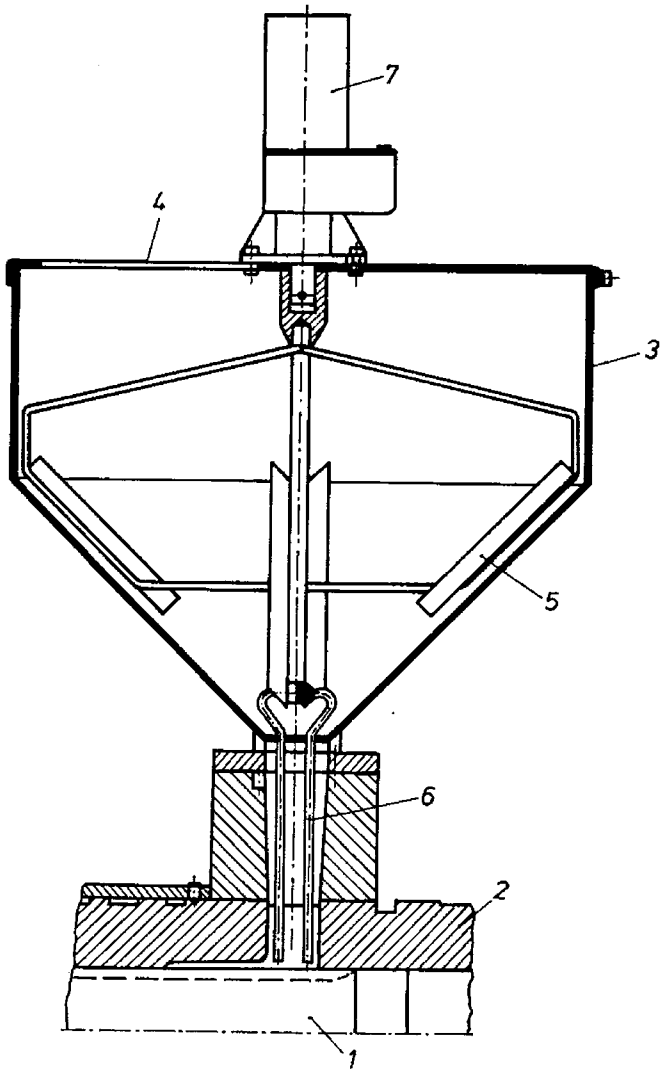
podawana jest do zasobnika wtryskarki często pneumatycznie, odpady zaś do rozdrabianiania doprowadza się również pneumatycznie lub zbiera w pojemniki, a te z kolei transportuje się środkami transportu wewnętrznego.

W celu skrócenia cyklu procesu wtryskiwania tworzywo wejściowe niekiedy podgrzewa się wstępnie do temperatury na ogół 60÷120°C i następnie wprowadza do układu uplastyczniającego. Podrzewanie można przeprowadzić w suszarce ustawionej w pobliżu wtryskarki lub lepiej za pomocą zasobnika susząco-podgrzewającego, zainstalowanego na wtryskarce. Usytuowanie grzejników wewnątrz zasobnika zapewnia — według firmy Whitlock Inc. (USA) — o 10÷20% mniejsze zużycie energii w porównaniu z umieszczeniem ich w urządzeniu poza zasobnikiem. Doprowadzenie tworzywa do zasobnika odbywa się różnymi sposobami, np. ręcznie lub pneumatycznie, ale również specjalnymi przenośnikami śrubowymi (rys. 5.71). Niektóre tworzywa



Rys. 5.71. Przenośnik śrubowy firmy Transitube (Niemcy): a÷e — zasilanie tworzywem zasobnika wtryskarki; a) z worka, b) z pojemnika jednoskładnikowego, c) z pojemnika dwuskładnikowego, d) po granulowaniu ze zbiornika granulatora, e) bezpośrednio z granulatora, f) schemat budowy przenośnika; *1* — silnik napędowy elementu śrubowego, *2* — sprzęgło, *3* — element śrubowy, *4* — łącznik, *5* — centralny przewód wewnętrzny, *6* — przewód przenośnika, *7* — łącznik ssący dolny

wprowadza się z zasobnika do układu uplastyczniającego z trudnościami. Tak jest w przypadku tworzyw w stanie plastycznym (rozdz. 3, p. 3.2.4), gdzie można także stosować wymuszony ruch tworzywa za pomocą dozownika poziomego z krótkim ślimakiem napędzanym, mocowanym do układu uplastyczniającego. Gdy tworzywo ma postać proszku, w zasobniku umieszcza się napędzane mieszadła, mające część roboczą zarówno w zbiorniku, jak i w otworze wysypowym (rys. 5.72), bądź tłoki wykonujące ruch postępowo-zwrotny [5.87].

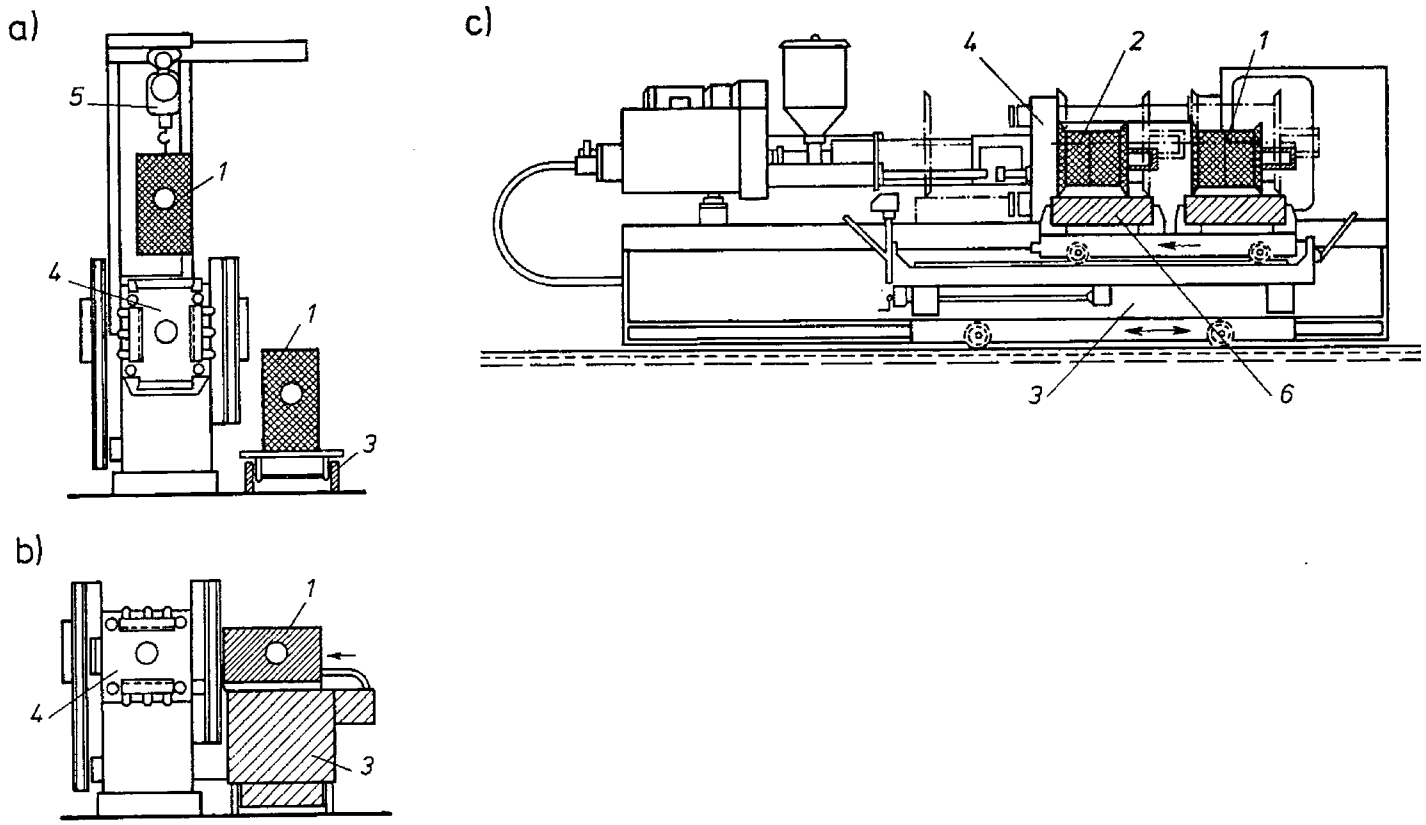


Rys. 5.72. Zasobnik do tworzywa w postaci proszku: *1* — ślimak, *2* — cylinder, *3* — obudowa zasobnika, *4* — otwór wsypowy, *5* — mieszadło zbiornika, *6* — mieszadło otworu wysypowego, *7* — silnik napędzający mieszadła

Formy wtryskowe na ogół mają dużą masę, ale zdarzają się formy o bardzo dużej masie, zatem są transportowane i mocowane do stołów wtryskarki za pomocą wózków, podnośników i specjalnych urządzeń (rys. 5.73). Ma to szczególne znaczenie przy częstej zmianie form, powodowanej przejściem z wtryskiwania jednej wypraski na inną.

Wypraski z wlewkami po wypchnięciu z gniazd mogą spadać na pochyłą rynnę, znajdującą się we wtryskarce pod formą i mogą być dalej transportowane przenośnikiem taśmowym, tak jak pokazano na rys. 5.70, bądź można je zbierać do pojemnika (rys. 5.74), a następnie dalej transportować w nim.

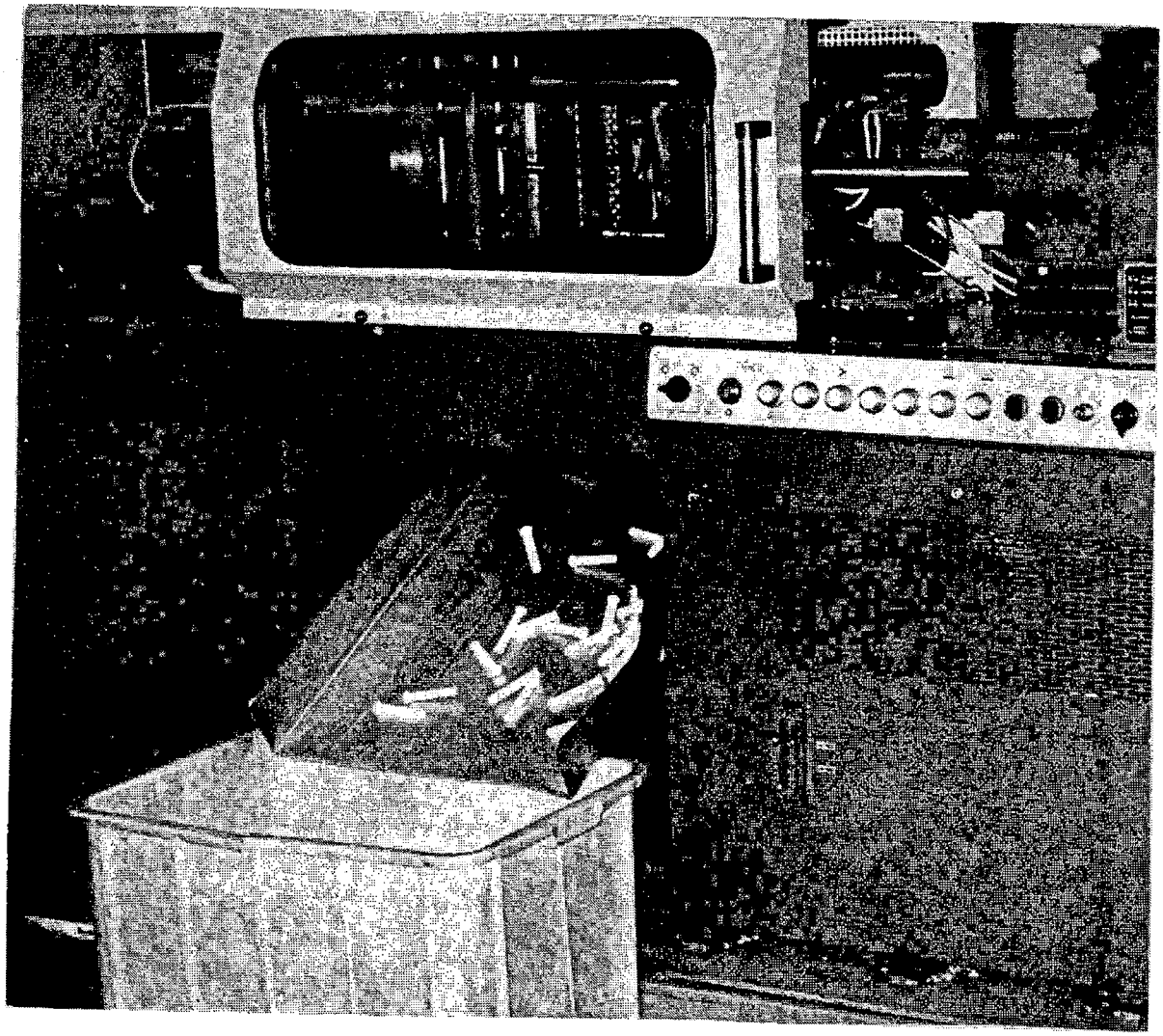
Po wypchnięciu z gniazda, wypraski mogą być odbierane i układane obok wtryskarki za pomocą robotów [5.97]. Ma to szczególne znaczenie podczas wtryskiwania dokładnościowego większych wyprasek. Spotyka się rozwiązanie robotów, np. z lat siedemdziesiątych, z chwytakami wykonującymi ruchy liniowe w dwóch płaszczyznach i obrotowe w jednej płaszczyźnie, niezależnie od ruchu obrotowego korpusu robota w drugiej płaszczyźnie (rys. 5.75). Robot taki bywa mocowany na



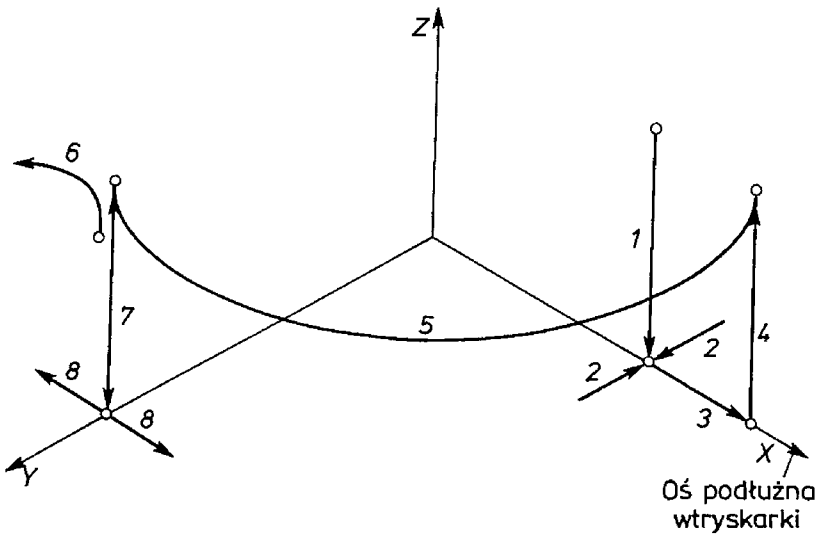
Rys. 5.73. Przenoszenie formy wtryskowej do wtryskarki: a) ruchem pionowym i poziomym, b) oraz c) ruchem poziomym; *1* — forma przed przeniesieniem do wtryskarki, *2* — forma zamocowana do stołów wtryskarki, *3* — wózek, *4* — stoły wtryskarki, *5* — podnośnik, *6* — suport przesuwający się prostopadle do prowadnic wtryskarki [5.3]

prowadnicach wtryskarki za stołem ruchomym. Inne roboty, nowsze [5.3, 5.16, 5.38, 5.96], mają elementy korpusu wykonujące ruchy liniowe w trzech płaszczyznach prostopadłych do siebie, a chwytak wykonuje ruchy obrotowe w dwóch płaszczyznach (rys. 5.76). Roboty są sterowane komputerowo.

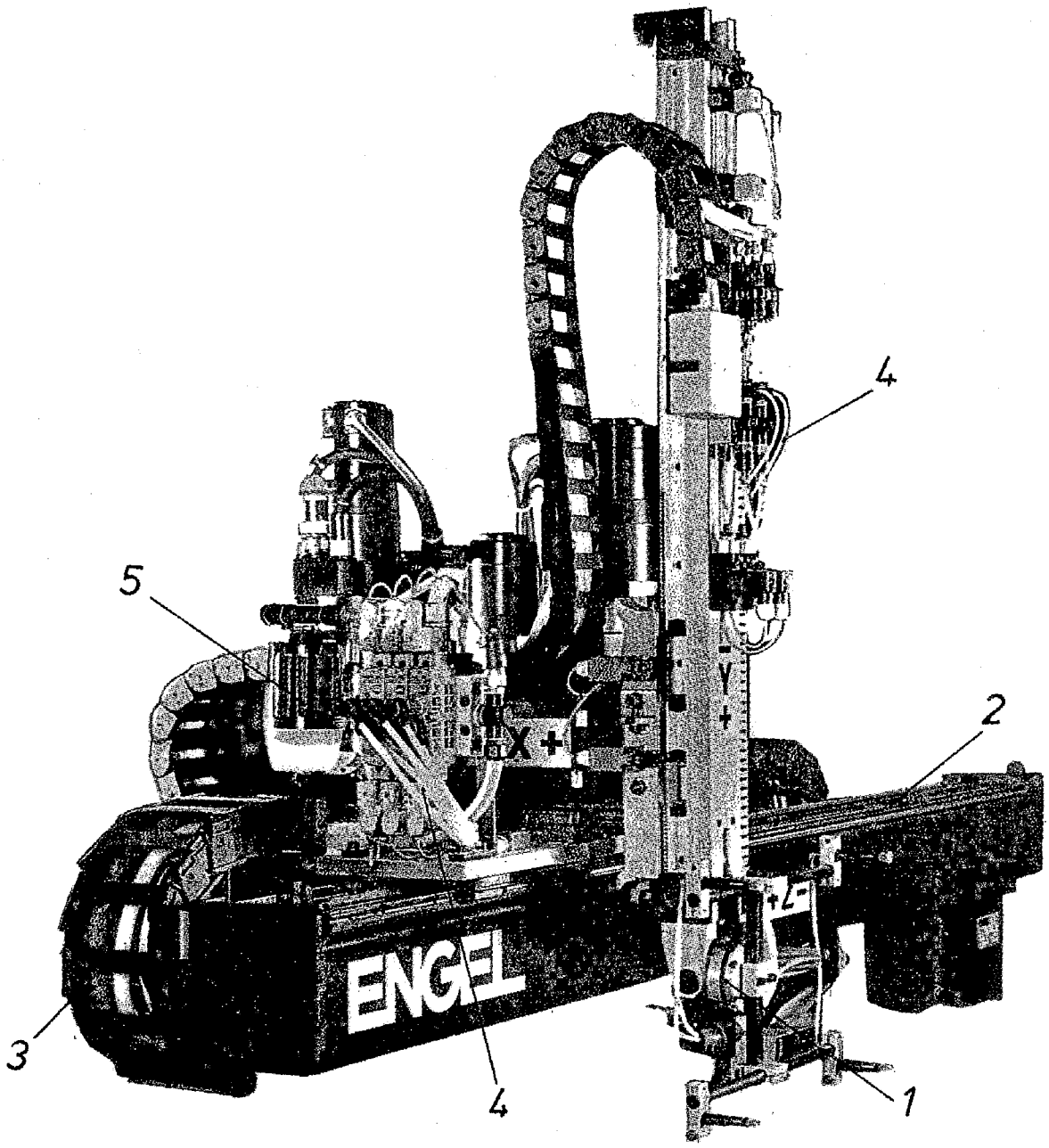
Jednym z ważnych kryteriów jakości wyprasek jest kryterium masowe (rozdz. 3, p. 3.2.2). Ważenie wyprasek może odbywać się ręcznie, co kilka wyprasek. Zazwyczaj jednak stosuje się wagi specjalne do ważenia wszystkich wyprasek. Waga taka może działać w następujący sposób [5.19]. Wypraska po wypchnięciu z gniazda spada na szalkę wagi, powodując zależnie od swej masy, ugięcie zespołu dźwigniowego. Wartość tego ugięcia zostaje przetworzona, przez zasilany z generatora czujnik indukcyjny i wzmacniacz pomiarowy, na sygnał napięciowy proporcjonalny do wartości masy wypraski. Sygnał ten jest porównywany przez blok komparatorów z napięciami odniesienia odpowiadającymi dolnej i górnej masie granicznej wypraski. Kiedy masa wypraski znajdującej się na szalce zawiera się między tymi masami i czas ważenia upłynął, układ sterujący wysyła poprzez blok zasilania sygnał do silnika, powodując ruch mechanizmu wyrzucającego wypraskę z szalki, oraz do układu sterowania wtryskarki w celu uruchomienia kolejnego cyklu wtryskiwania. W przypadku, gdy oznaczana masa wypraski nie mieści się w tolerancji masy, a czas ważenia upłynie, sygnały takie nie zostaną wysłane, co spowoduje pozostanie wypraski na szalce i zablokowanie cyklu wtryskiwania.



Rys. 5.74. Fragment wtryskarki po wypchnięciu wyprasek z gniazda formy — wypraski spadają na rynnę pochyłą, zbierając się w pojemniku; wlewek oddzielił się od wyprasek w chwili spadku na rynnę i jako cięższy przemieścił się pierwszy do pojemnika



Rys. 5.75. Trajektoria ruchu robota (przykład): *1* — opuszczenie chwytaka w otwartą formę, *2* — zacisk wypraski, *3* — odsunięcie wypraski, *4* — podniesienie wypraski ponad prowadnice, *5* — obrót robota o kąt $(\pi/2)$ rad, *6* — obrót chwytaka w płaszczyźnie prostopadłej do obrotu *5*, *7* — opuszczenie wypraski na paletę, *8* — zwolnienie zacisku wypraski



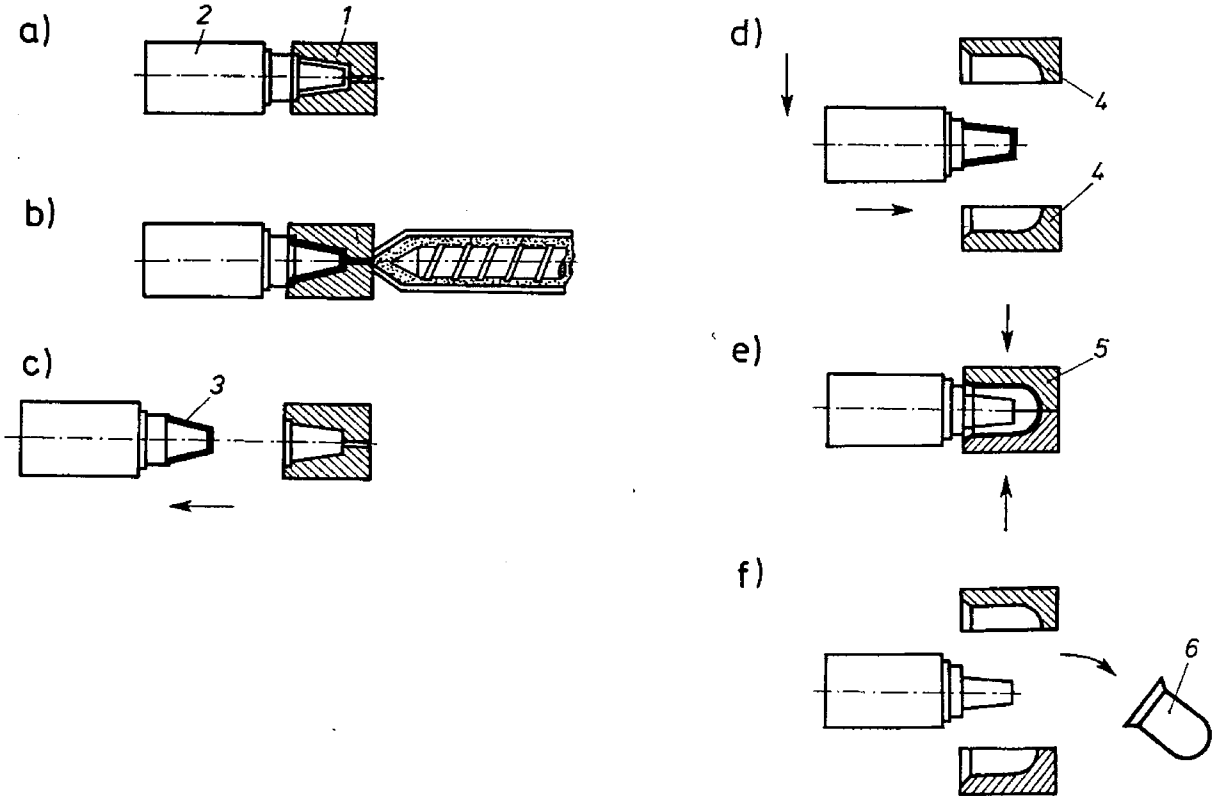
Rys. 5.76. Wygląd robota firmy Engel (Austria): *1* — chwytak, *2* — szyna do przesuwu w płaszczyźnie poziomej (odsunięcie wypraski poza wtryskarkę), *3* — główne przewody pneumatyczne w obudowie, *4* — przewody pneumatyczne, *5* — filtr powietrza

5.5.7. Wtryskiwanie z rozdmuchiwaniem

W procesie technologicznym wtryskiwania z rozdmuchiwaniem, podobnie jak w procesie technologicznym wytłaczania z rozdmuchiwaniem nieswobodnym — w formie, otrzymuje się różne pojemniki z tworzyw termoplastycznych. Zarówno proces wtryskiwania, jak i proces rozdmuchiwania są cykliczne, zatem ich połączenie stanowi również proces cykliczny. Wtryskiwanie z rozdmuchiwaniem odbywa się na stanowiskach technologicznych i dzieli na bezpośrednie i sekwencyjne.

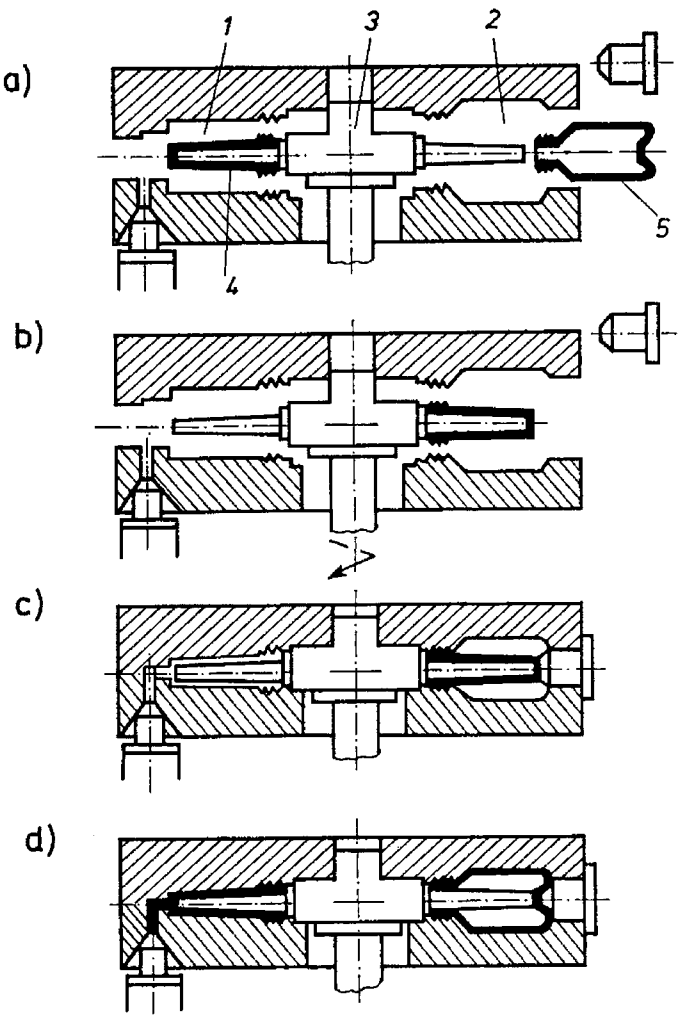
W *bezpośrednim procesie wtryskiwania z rozdmuchiwaniem* otrzymuje się w formie wtryskowej wypraskę mającą kształt naczynia, będącą kształtką wstępną. Po niezbędnym ochłodzeniu i otwarciu formy wtryskowej, kształtkę wstępną przemieszcza się na rdzeniu do gniazda formy rozdmuchowej, formę zamyka, kształtkę stabilizuje cieplnie i rozdmuchuje, aż do przyjęcia kształtu i wymiarów gniazda rozdmuchowego. Następnie tworzywo zestala się, formę się otwiera i otrzymany pojemnik usuwa z gniazda. Podczas rozdmuchiwania odbywa się rozciąganie w kierunku poprzecznym oraz w mniejszym stopniu w kierunku wzdłużnym tworzywa plastycznego, ale orientacja molekularna na ogół jest mała.

Spotyka się kilka rozwiązań bezpośredniego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem. Tak np. na rys. 5.77 przedstawiono schemat bezpośredniego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem za pomocą oddzielnej jednogniazdowej formy wtryskowej i *formy* jednogniazdowej *rozdmuchowej*. Z kolei na rys. 5.78 jest pokazany schemat bezpośred-



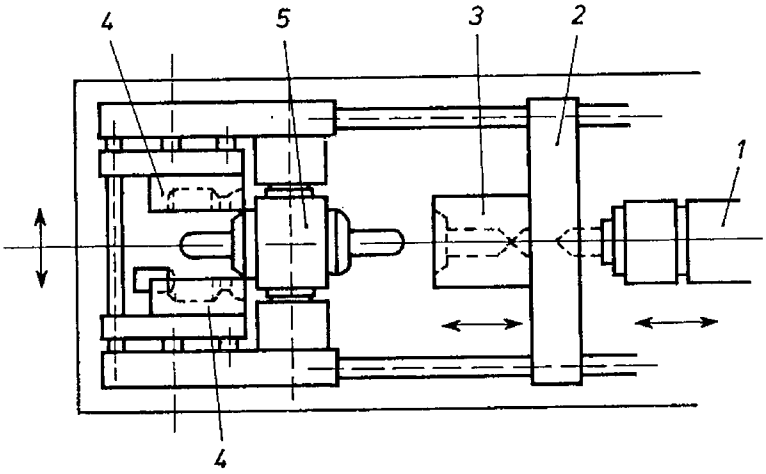
Rys. 5.77. Schemat bezpośredniego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem przy użyciu oddzielnych form jednogniazdowych — wtryskowej i rozdmuchowej: a) przed procesem, b) po wtrysku wypraski — kształtki wstępnej, c) wyjęcie rdzenia z formy wtryskowej z osadzoną na nim kształtką wstępną, d) wprowadzenie rdzenia do otwartej formy rozdmuchowej, e) zamknięcie formy rozdmuchowej, stabilizacja cieplna kształtki wstępnej, rozdmuchiwanie, f) zestalenie tworzywa, otwarcie formy rozdmuchowej, usunięcie pojemnika z gniazda; *1* — forma wtryskowa, *2* — rdzeń, *3* — wypraska (kształtka wstępna), *4* — otwarta forma rozdmuchowa, *5* — zamknięta forma rozdmuchowa, *6* — pojemnik

niego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem za pomocą jednolitej *formy* jednogniazdowej *wtryskowo-rozdmuchowej*, czyli formy z jednym gniazdem wtryskowym i z jednym gniazdem rozdmuchowym, według rozwiązania firmy Nissei (Japonia) z 1973 r. Forma ta ma trzpień obrotowy z dwoma identycznymi rdzeniami, wykonującymi ruch obrotowy w płaszczyźnie poziomej. W rozwiązaniu firmy Procrea



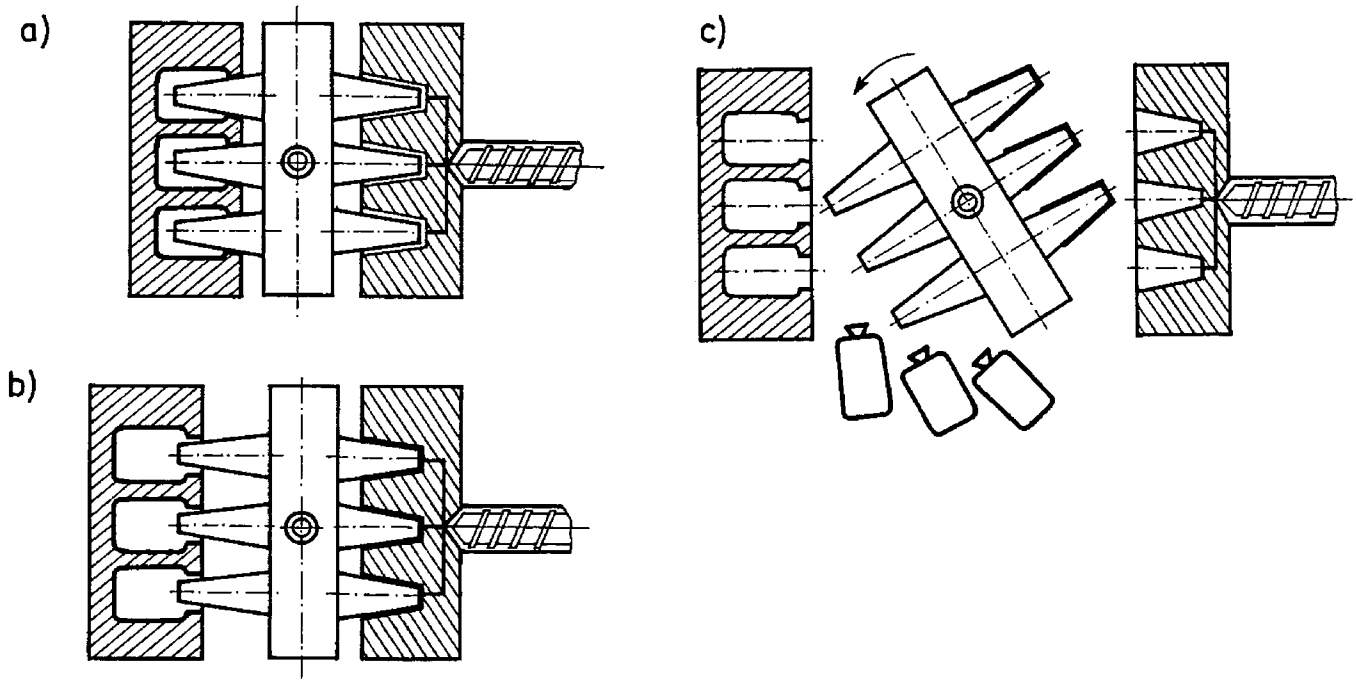
Rys. 5.78. Schemat bezpośredniego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem przy użyciu jednolitej formy jednogniazdowej wtryskowo-rozdmuchowej z trzpieniem obrotowym: a) otwarcie formy, usunięcie pojemnika z gniazda rozdmuchowego, b) obrót trzpieni z dwoma rdzeniami o kąt π rad, c) zamknięcie formy, stabilizacja cieplna wypraski — kształtki wstępnej, d) rozdmuchiwanie kształtki wstępnej, wtryskiwanie wypraski — kształtki wstępnej; *1* — gniazdo wtryskowe, *2* — gniazdo rozdmuchowe, *3* — trzpień obrotowy z rdzeniami, *4* — wypraska (kształtka wstępna), *5* — pojemnik

Construzione Presse (Włochy) z 1988 r. trzpień z co najmniej dwoma identycznymi rdzeniami wykonuje ruch obrotowy w płaszczyźnie pionowej (rys. 5.79). W czasie wtryskiwania wypraski — kształtki wstępnej, druga — po przeciwej stronie — jest rozdmuchiwana, po czym następuje odsunięcie stołu wtryskarki położonego od strony układu uplastyczniającego wraz z przymocowaną do niej formą wtryskową, otwarcie formy rozdmuchowej, usunięcie pojemnika i obrót trzpienia z rdzeniami o kąt π rad.



Rys. 5.79. Schemat bezpośredniego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem przy użyciu oddzielnych form jednogniazdowych — wtryskowej i rozdmuchowej z trzpieniem obrotowym (rzut z góry): *1* — układ uplastyczniający, *2* — stół ruchomy wtryskarki, *3* — forma wtryskowa, *4* — otwarta forma rozdmuchowa, *5* — trzpień obrotowy z rdzeniami

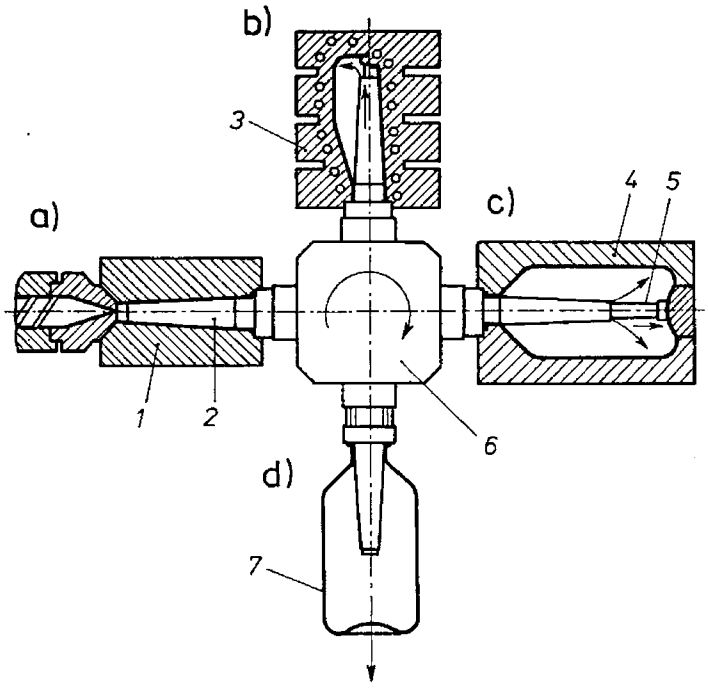
W przedstawionych dotąd przykładach bezpośredniego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem, jednemu gniazdu wtryskowemu odpowiadało jedno gniazdo rozdmuchowe. Znane są jednak rozwiązania, w których liczby gniazd formujących nie są sobie równe, np. można proces ten prowadzić za pomocą jednolitej formy mającej jedno gniazdo wtryskowe i dwa gniazda rozdmuchowe [5.121]. W celu zwiększenia wydajności stosuje się również formy wielogniazdowe (rys. 5.80).



Rys. 5.80. Schemat bezpośredniego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem przy użyciu oddzielnych form trójgniazdowych — wtryskowej i rozdmuchowej, z trzpieniem obrotowym: a) rozdmuchiwanie pojemników, b) ochładzania pojemników i wtryskiwanie wyprasek — kształtek wstępnych, c) usuwanie pojemników, obrót trzpienia z rdzeniami o kąt π rad

Główną wadą bezpośredniego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem jest w zasadzie to samo, co jednoetapowego wytłaczania z rozdmuchiwaniem.

W *sekwencyjnym procesie wtryskiwania z rozdmuchiwaniem* na początku postępuje się podobnie, jak w procesie bezpośrednim, ale wypraskę — kształtkę wstępną — ochładza się do temperatury otoczenia lub wstępnie rozdmuchuje, w celu otrzymania *prepojemnika* o mniejszych rozmiarach i grubszej ściance, oraz stabilizuje cieplnie. Następnie kształtkę wstępną podgrzewa się i rozdmuchuje, a prepojemnik tylko rozdmuchuje, otrzymując pojemnik. Rozdmuchiwanie pojemnika może być wspomagane wzdłużnym rozciąganiem mechanicznym za pomocą tłoka. Wiadomości dotyczące temperatury prepojemnika w chwili rozpoczęcia rozdmuchiwania ostatecznego są identyczne, jak podczas dwuetapowego wytłaczania z rozdmuchiwaniem. W omawianym przypadku jest również znanych kilka rozwiązań. Na rysunku 5.81 przedstawiono schemat jednego z nich. Interesujące jest rozwiązanie firmy Sumitomo-Netstal (Japonia) z 1985 r. Jego istota polega na umieszczeniu układu trzpienia obrotowego z rdzeniami na wtryskarce między dwoma stołami nieruchomymi. Do stołu położonego od strony układu uplastyczniającego jest zamocowana forma wtryskowa, a do stołu przeciwległego *forma rozdmuchowa*. Rozmieszczenie pozos-



Rys. 5.81. Schemat sekwencyjnego wtryskiwania z rozdmuchiwaniem: a) wtryskiwanie wypraski — kształtki wstępnej, b) wstępne rozdmuchiwanie prepojemnika i jego stabilizacja cieplna, c) rozdmuchiwanie i rozciąganie pojemnika tłokiem wysuwanym z rdzenia, d) ochładzanie i usunięcie pojemnika; *1* — forma wtryskowa, *2* — rdzeń, *3* — forma do wstępnego rozdmuchiwania prepojemnika i stabilizacji cieplnej, *4* — forma do rozdmuchiwania z rozciąganiem pojemnika, *5* — tłok rozciągający wysuwany z rdzenia, *6* — trzpień obrotowy z rdzeniami, *7* — pojemnik

tałych stanowisk jest takie, jak na rys. 5.81. Oba stoły są połączone prowadnicami, po których układ trzpienia obrotowego wykonuje ruch postępowo-zwrotny. Liczba gniazd wtryskowych i rozdmuchowych wynosi 6÷12, całkowity czas procesu 14÷17 s, a wydajność 1500÷2800 butelek (z PET o pojemności 1/2 litra) na godzinę.

Pojemniki wytwarzane sekwencyjnym wtryskiwaniem z rozdmuchiwaniem odznaczają się cienkimi ściankami, a jednocześnie względnie dużą wytrzymałością i trwałością, co jest spowodowane dwuosiową orientacją molekularną tworzywa.

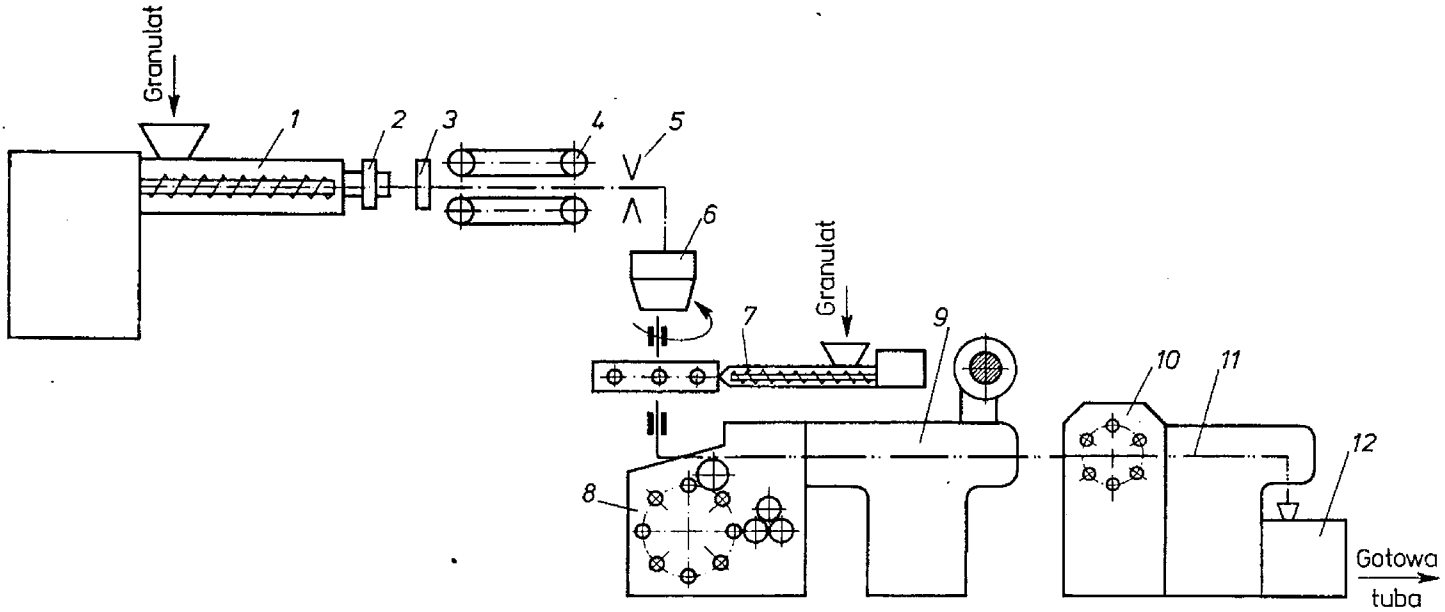
Kształtka wstępna może być również otrzymywana w procesie wtryskiwania wieloskładnikowego i wówczas pojemnik jest wielowarstwowy o właściwościach barierowych, np. trójwarstwowy PET/PA 6/PET lub pięciowarstwowy PET/PA 6/PET/PA 6/PET [5.75]. W takich pojemnikach można przechowywać napoje zawierające CO_2 bez obawy jego dyfuzji [5.133].

Czynnikiem powodującym wypełnianie gniazda formy rozdmuchowej jest zazwyczaj sprężone powietrze, ale mogą być także inne czynniki. Dużego znaczenia nabiera ciecz pod ciśnieniem, która po rozprężeniu pozostaje w pojemniku. Proces taki można nazywać *wtryskiwaniem z napełnianiem*. Znalazł on zastosowanie głównie do wytwarzania pojemników napełnionych cieczą do celów medycznych. Tak na przykład otrzymuje się małe pojemniki z PP napełnione ściśle określoną dawką cieczy, którą wprowadza się do kształtki wstępnej pod określonym ciśnieniem i w podwyższonej temperaturze zapewniającej sterylizację [5.94].

5.5.8. Wtryskiwanie z wytłaczaniem

Proces technologiczny wtryskiwania z wytłaczaniem stosuje się do otrzymywania wytworów składających się z części wtryskiwanych i wytłaczanych, integralnie ze sobą związanych. Odbywa się on w liniach technologicznych łącznie z jeszcze innymi procesami i zostanie przedstawiony na przykładzie otrzymywania tub z PE jako opakowań [5.74, 5.137].

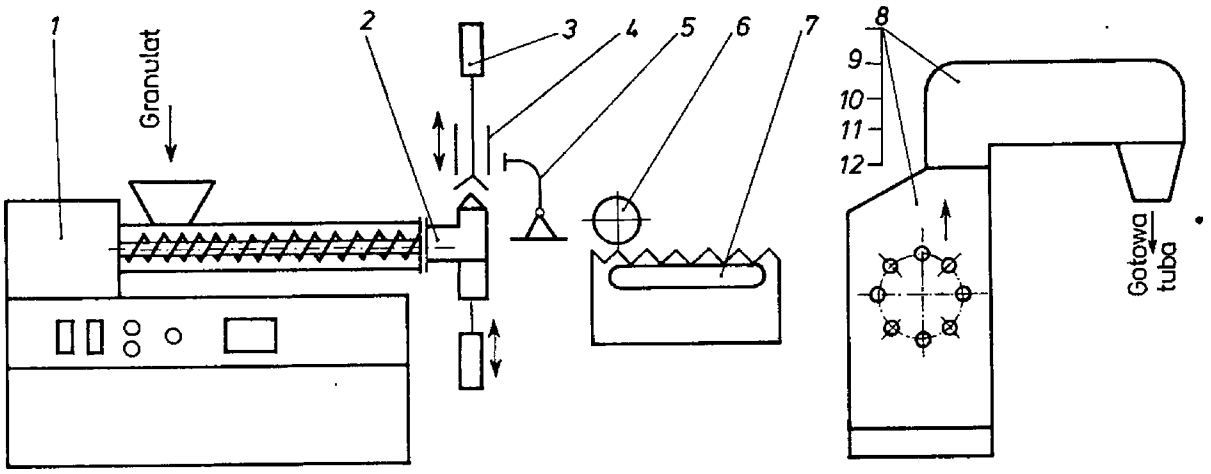
Za pomocą wytłaczarki jednoślimakowej, wyposażonej w głowicę liniową lub kątową do rur, wytłacza się rurę cienkościenną, którą kalibruje się zewnętrznie i wewnętrznie. Następnie zachodzi: aktywowanie powierzchni zewnętrznej rury, przecinanie rury na odcinki o odpowiedniej długości, wtryskiwanie główki tuby, zgrzewanie bądź klejenie główki z korpusem tuby, drukowanie na korpusie tuby, suszenie nadruku w tunelu, lakierowanie powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej tuby, suszenie warstwy lakieru w tunelu i montaż nakrętki. Schemat linii technologicznej jest przedstawiony na rys. 5.82. W podany sposób są wytwarzane tuby w liniach technologicznych firmy Tupac (Austria) i Baumann (Szwajcaria).



Rys. 5.82. Schemat linii technologicznej wytwarzania tub z PE metodą wtryskiwania z wytłaczaniem: *1* — wytłaczarka, *2* — głowica do rur, *3* — aktywator, *4* — urządzenie odbierające, *5* — urządzenie przecinające (noże obrotowe), *6* — zbiornik, *7* — wtryskarka, *8* — zgrzewarka i drukarka, *9* — suszarka tunelowa, *10* — lakierka, *11* — suszarka tunelowa, *12* — urządzenie do montażu nakrętek

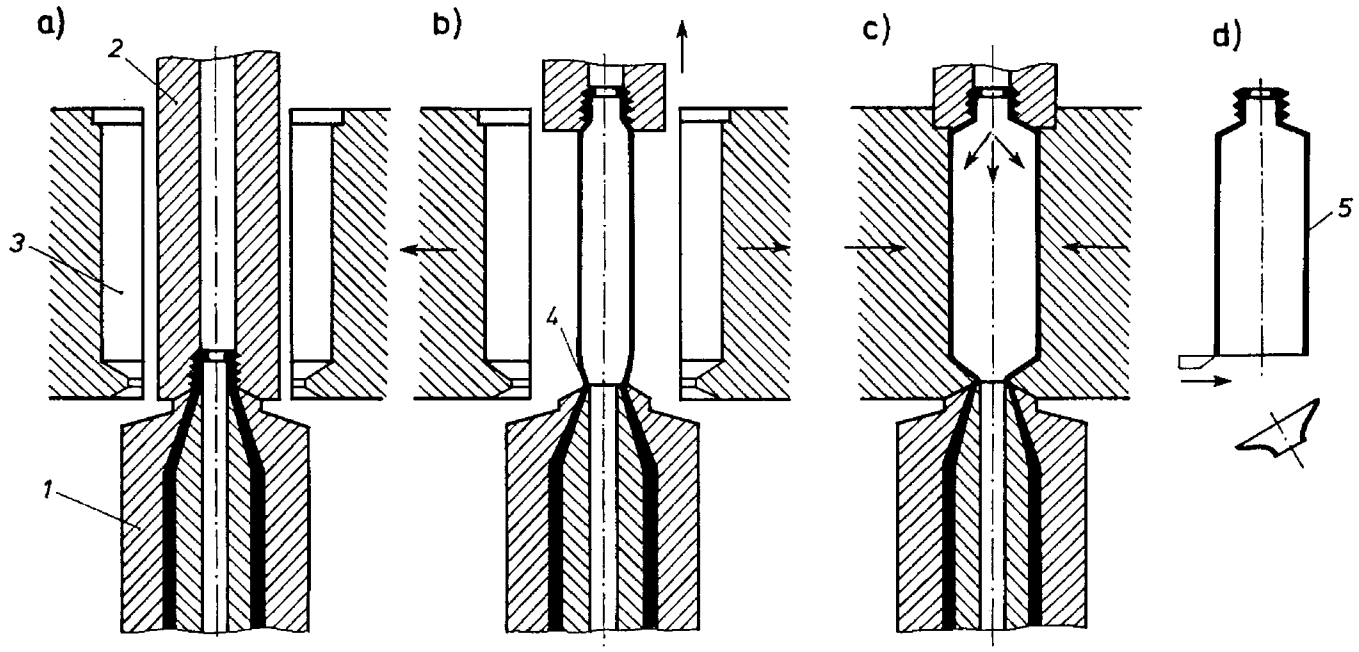
Tuby wytwarza się w bardzo dużych ilościach; np. w Polsce, łącznie z tubami z deficytowego aluminium, wytwarza się blisko 200 mln sztuk rocznie. Istotne znaczenie ma więc koszt jednostkowy wytworzenia tuby. Okazuje się, że można go obniżyć, stosując inne niż wyżej omówione rozwiązanie linii technologicznej.

Linia technologiczna do wytwarzania tub składa się z (rys. 5.83): wtryskarki ślimakowej wyposażonej w głowicę kątową wtryskowo-wytłaczarską, urządzenia formująco-odciągającego, formy rozdmuchowej, urządzenia odbierającego tubę, obcinarki dna tuby, urządzenia do montażu nakrętki, aktywatora powierzchni tuby,



Rys. 5.83. Schemat linii technologicznej wytwarzania tub z PE metodą wtryskiwania i wytłaczania z rozdmuchiwaniem: *1* — wtryskarka, *2* — głowica kątowa wtryskowo-wytłaczarska, *3* — urządzenie formująco-odciągające, *4* — forma rozdmuchowa, *5* — urządzenie odbierające tubę, *6* — obcinarka dna tuby, *7* — transporter, *8* ÷ *12* — urządzenie do montażu nakrętki, aktywator, drukarka, lakierka i suszarka

drukarki, lakierki i suszarki. Sam proces formowania tuby obejmuje wtryskiwanie główki tuby, wytłaczanie i wyciąganie węża tworzywa, rozdmuchiwanie węża i odcinanie dna tuby (rys. 5.84). Głowica kątowa wtryskowo-wytłaczarska jest przymoco-



Rys. 5.84. Proces formowania tuby z PE: a) wtryskiwanie główki tuby, b) wytłaczanie i wyciąganie węża, c) rozdmuchiwanie węża, d) odcinanie dna tuby; *1* — zakończenie głowicy kątowej wtryskowo-wytłaczarskiej, *2* — sprężysta tuleja dzielona urządzenia formująco-odcinającego, *3* — forma rozdmuchowa, *4* — wąż tworzywa, *5* — tuba

wana do cylindra wtryskarki, podobnie jak w typowych rozwiązaniach przy wytłaczaniu. Ma ona dyszę szczelinową pierścieniową i suwak z napędem hydraulicznym, zamykający lub otwierający przepływ tworzywa od układu uplastyczniającego. Urządzenie formująco-odciągające służy do formowania główki tuby i odciągania wytłoczonego węża. Jego podstawowy element — sprężysta tuleja dzielona — wykonuje ruch postępowo-zwrotny w otwartej formie rozdmuchowej, prostopadły do

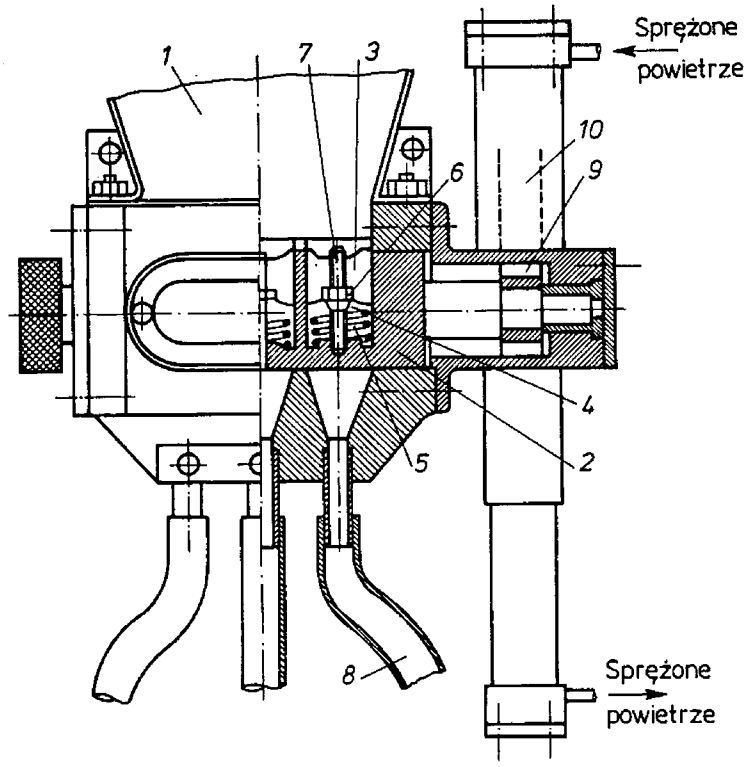
kierunku ruchu zamykania i otwierania formy. Wewnątrz tulei znajduje się igła, która formuje otwór w główce tuby oraz doprowadza sprężone powietrze do rozdmuchania węża. Forma rozdmuchowa składa się z dwóch symetrycznych części, w których znajduje się gniazdo formujące. Odcinanie węża odbywa się tak, jak w procesie wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie (p. 5.4.3), z tym że tylko w dolnej części formy. Przedstawioną metodą wytwarza się tuby w linii technologicznej firmy Ossberger (Niemcy) i OBR Metalchem w Toruniu [5.125].

5.5.9. Proces technologiczny prasowania

Proces technologiczny prasowania odbywa się zazwyczaj na stanowiskach technologicznych. Stanowiska technologiczne prasowania tłocznego i przetłocznego składają się głównie z prasy, urządzenia do dozowania odpowiedniej ilości tworzywa wejściowego — tłoczywa proszkowego lub będącego w stanie plastycznym, bądź dozowania odpowiedniej liczby tabletek, jak również pojedynczej tabletki, urządzenia odbierającego i bardzo często podgrzewarki oraz także z oprzyrządowania technologicznego.

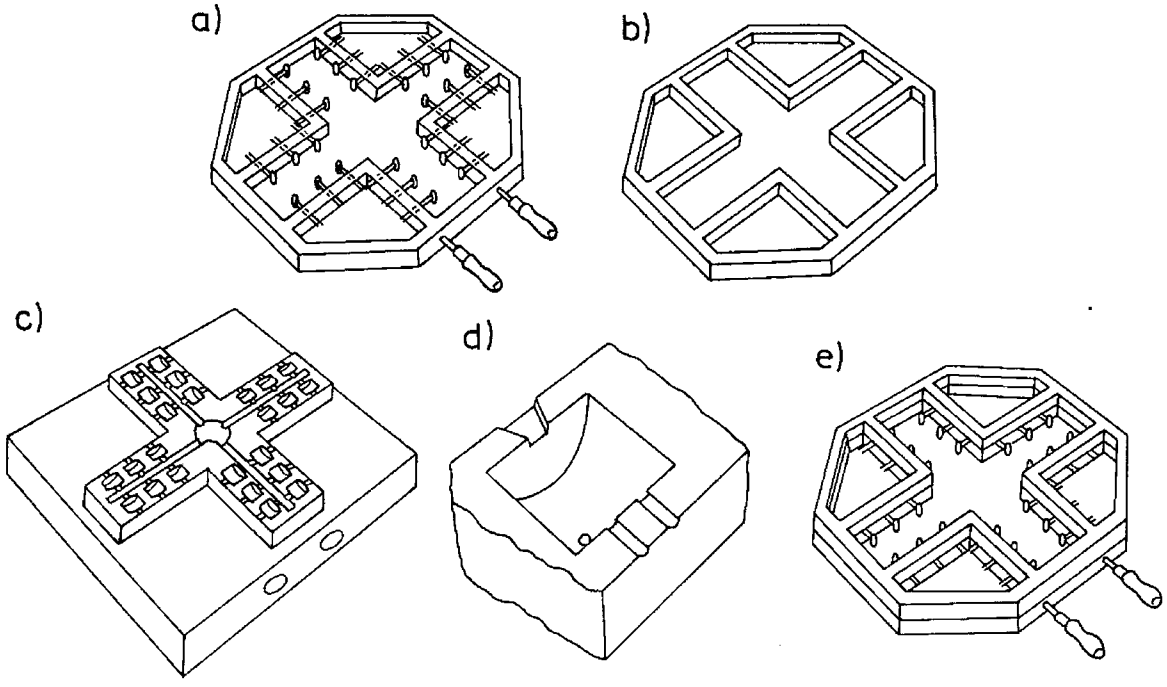
W procesach prasowania szczególną rolę spełniają procesy uzupełniające przygotowawcze. W przypadku prasowania tłocznego i przytłocznego polegają one na sporządzaniu tłoczywa proszkowego i na ogół jego tabletkowaniu lub sporządzaniu tłoczywa w stanie plastycznym, podgrzewaniu tłoczyw i ich dozowaniu. Podczas sporządzania tłoczywa proszkowego lub będącego w stanie plastycznym zachodzi mieszanie składników wprowadzanych w określonych ilościach i ustalonej kolejności (rozdz. 3, p. 3.7). Tabletkowanie przedstawiono w rozdz. 3, p. 3.3.1, natomiast podgrzewanie w rozdz. 2, p. 2.4.2. Sporządzanie nie tylko tłoczywa proszkowego i mającego stan plastyczny, ale również arkuszowego, odbywa się na oddzielnych stanowiskach lub liniach technologicznych. Tabletkowanie również prowadzi się oddzielnie, ale znane są rozwiązania (rzadko stosowane), w których na jednej prasie specjalnej odbywa się tabletkowanie i prasowanie [5.69]. Podgrzewanie i dozowanie zachodzi już tylko bezpośrednio na stanowisku technologicznym prasowania tłocznego i przetłocznego.

Dozowanie może być przede wszystkim objętościowe i mniej rozpowszechnione —masowe [5.29, 5.65, 5.128]. Na rysunku 5.85 przedstawiono przykładowo dozownik do tłoczyw proszkowych, mocowany w górnej części prasy. Pod zasobnikiem (*1*) tłoczywa proszkowego jest umieszczony walec obrotowy (*2*) z komorami dozującymi (*3*) w liczbie równej liczbie gniazd formujących w formie prasowniczej. Dna komór tworzą płytki (*4*) wspierające się na sprężynach (*5*) dociskane nakrętkami (*6*) obracającymi się na śrubach (*7*). Przy obrocie nakrętek (*6*) następuje przesuwanie płytek (*4*) i poprzez to regulowanie pojemności komór. Po wypełnieniu komór proszkiem, pod wpływem jego siły ciężkości następuje obrót walca (*2*) o kąt π rad i wysypanie zawartości komór do przewodów giętkich (*8*) i dalej ruch grawitacyjny tłoczywa do formy prasowalniczej. Obracanie walca (*2*) zachodzi za pomocą osadzonego na jego czopie koła zębatego (*9*) zazębiającego się z zębatką (*10*) napędzaną pneumatycznie. Przykład rozwiązania dozowania tłoczywa w postaci tabletek można znaleźć w literaturze [5.69].



Rys. 5.85. Dozownik grawitacyjny wielogniazdowy do tłoczyw proszkowych, mocowany w górnej części prasy [5.65, 5.69]; oznaczenia w tekście

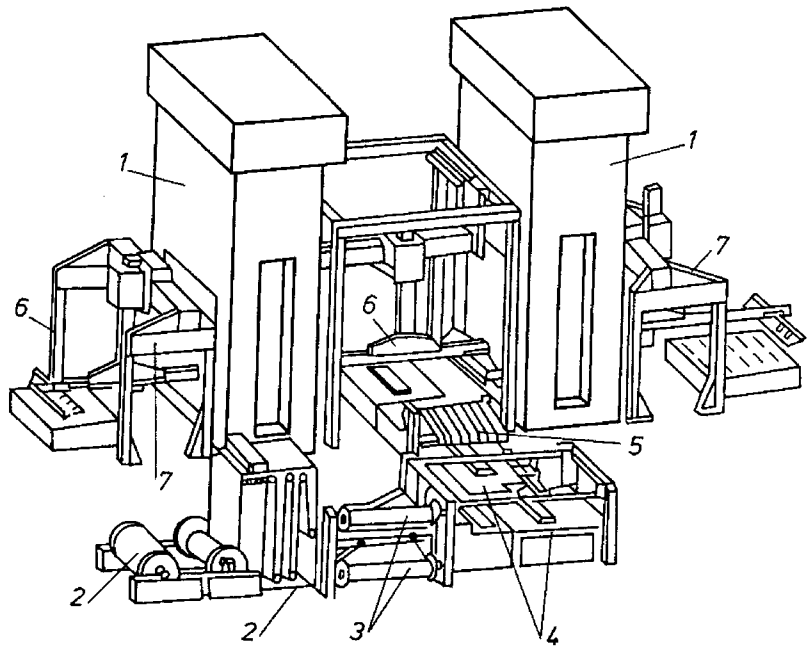
Na rysunku 5.86 pokazano dla przykładu oprzyrządowanie technologiczne w postaci *ramy załadowczej* stosowanej przy hermetyzacji przetłocznej elementów elektronicznych. Podzespoły załadowuje się do dolnej części ramy, a na nią nakłada się górną część ramy. Ramę załadowczą umieszcza się na dolnej części formy tak, aby podzespoły znajdowały się w gniazdach, formę zamyka się i przeprowadza proces prasowania.



Rys. 5.86. Rama załadowcza i forma prasowalnicza: a) dolna część ramy z załadowanymi elementami elektronicznymi, b) górna część ramy, c) dolna część formy, d) gniazdo formujące, e) rama z załadowanymi elementami elektronicznymi [5.101]

Stanowiska technologiczne prasowania płytowego i niskociśnieniowego różnią się od stanowisk technologicznych prasowania tłocznego i przetłocznego przede wszystkim konstrukcją urządzeń uzupełniających zarówno przygotowawczych, jak i zakończeniowych, tłoczywo bowiem ma tu postać arkuszy.

Do prasowania niskociśnieniowego laminatów dość szeroko stosuje się poliestrowe tłoczywa arkuszowe jednolite SMC — rys. 5.90, TMC — rys. 5.92 i ze wzmocnieniem hybrydowym — rys. 5.91 (symbole tłoczyw według W. Królikowskiego i współpracowników [5.61]). Na stanowisku technologicznym prasowania (rys. 5.87) za-



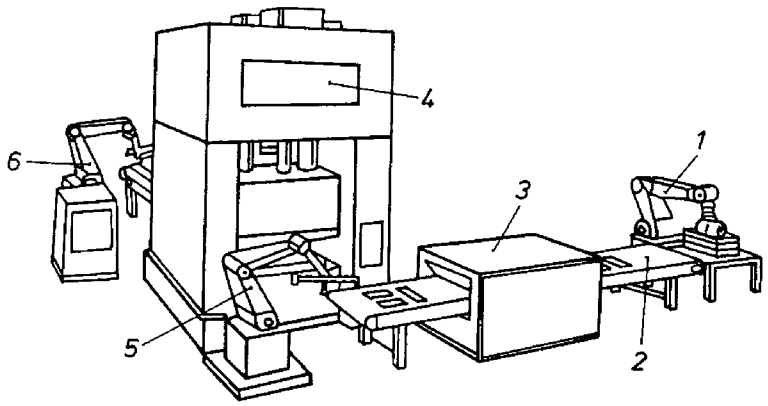
Rys. 5.87. Stanowisko technologiczne prasowania niskociśnieniowego poliestrowych tłoczyw arkuszowych jednolitych SMC: *1* — prasy hydrauliczne, *2* — urządzenie do odwijania tłoczywa, *3* — urządzenie do zwijania zdzieranych folii ochronnych, *4* — urządzenie do wykrawania tłoczywa, *5* — układarka wykrojów, *6* — chwytaki pneumatyczne i igłowe, *7* — urządzenia odbierające

chodzi odwijanie tłoczywa ze zwoju, zdzieranie ochronnych folii polimerowych (głównie PE) i zwijanie ich na wałach, wykrawanie wykrojów o danych kształtach i wymiarach, odpowiednie układanie wykrojów w gnieździe, prasowanie wyprasek z tolerancją grubości 0,01 mm oraz układanie wyprasek. Stanowisko takie firmy Hösch (Niemcy) jest zautomatyzowane i sterowane komputerowo. Czas cyklu prasowania często nie przekracza 1 minuty. Prasy są górnocylindrowe i odznaczają się „krótkim podnoszeniem" — bliższe wiadomości o nich znajdują się w literaturze [5.59]. Gdy zachodzi potrzeba uzyskania bardzo gładkiego i twardego naskórka na wyprasce, stosuje się napylanie na powierzchnię wypraski, po wstępnym prasowaniu, proszku tworzywa utwardzalnego, który bardzo szybko (około 1 s) stapia się i dostatecznie utwardza [5.58].

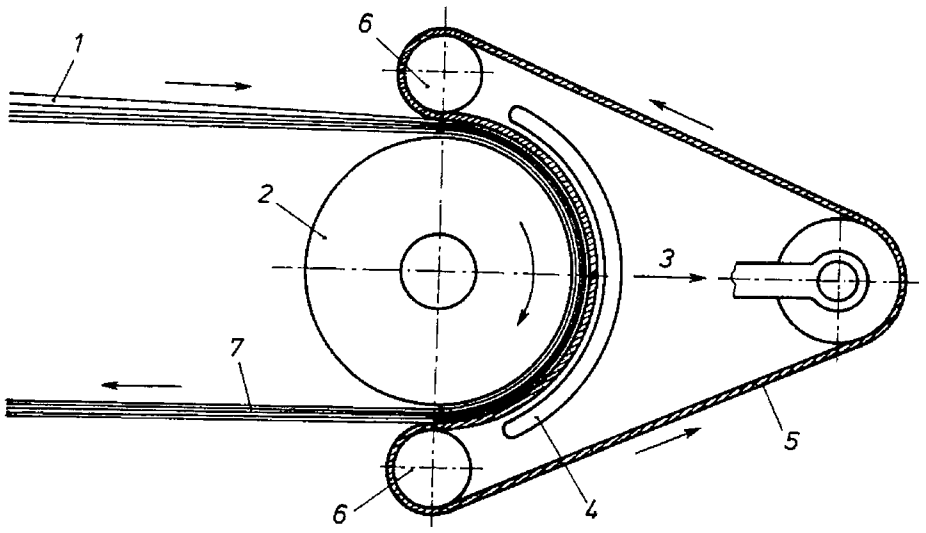
Od 1978 r. na laminatowe skorupowe części samochodowe (np. błotniki) oraz na inne części stosuje się tłoczywa arkuszowe zespolone (tłoczywa TWM — rys. 5.93). Proces prasowania tych tłoczyw może być niskociśnieniowy (około 5 MPa) oraz wysokociśnieniowy (15÷20 MPa) i odbywa się na stanowiskach technologicznych

(rys. 5.88). W obu przypadkach stosuje się podwyższoną temperaturę prasowania, zbliżoną do temperatury topnienia, i podgrzewanie do temperatury 40÷80°C. Czas cyklu prasowania wynosi 20÷80 s.

W nielicznych przypadkach proces prasowania odbywa się w liniach technologicznych. Na rysunku 5.89 przedstawiono jedno z możliwych rozwiązań prasowania niskociśnieniowego ciągłego laminatów w linii technologicznej.



Rys. 5.88. Stanowisko technologiczne prasowania tłoczyw arkuszowych laminatowych (tłoczyw TWM): *1* — urządzenie podające wykroje tłoczywa, *2* — przenośnik taśmowy, *3* — podgrzewarka, *4* — prasa hydrauliczna, *5* — układarka wykrojów, *6* — urządzenie odbierające [5.58]

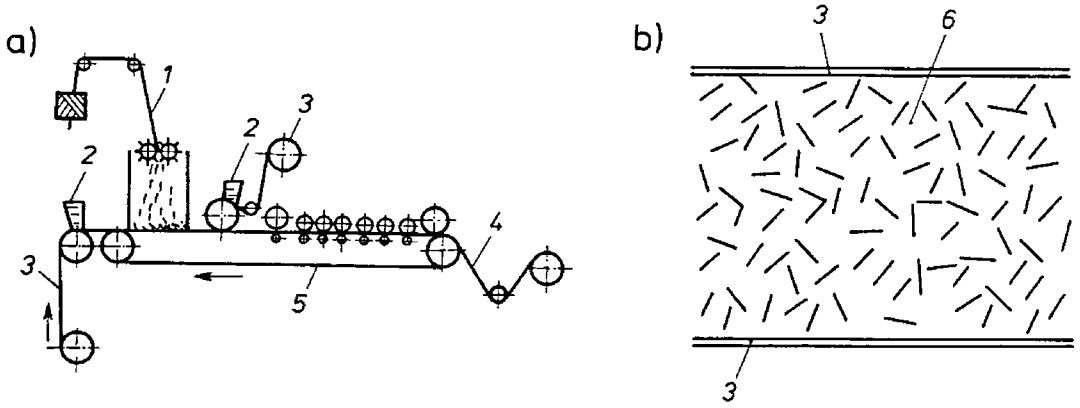


Rys. 5.89. Fragment linii technologicznej prasowania niskociśnieniowego ciągłego laminatów utwardzalnych: *1* — wstęga przesyconego nośnika, *2* — główny walec ogrzewany, *3* — naciąg, np. hydrauliczny, *4* — grzejnik, *5* — dociskowa taśma stalowa, *6* — dodatkowe walce ogrzewane, *7* — taśma laminatu [5.12]

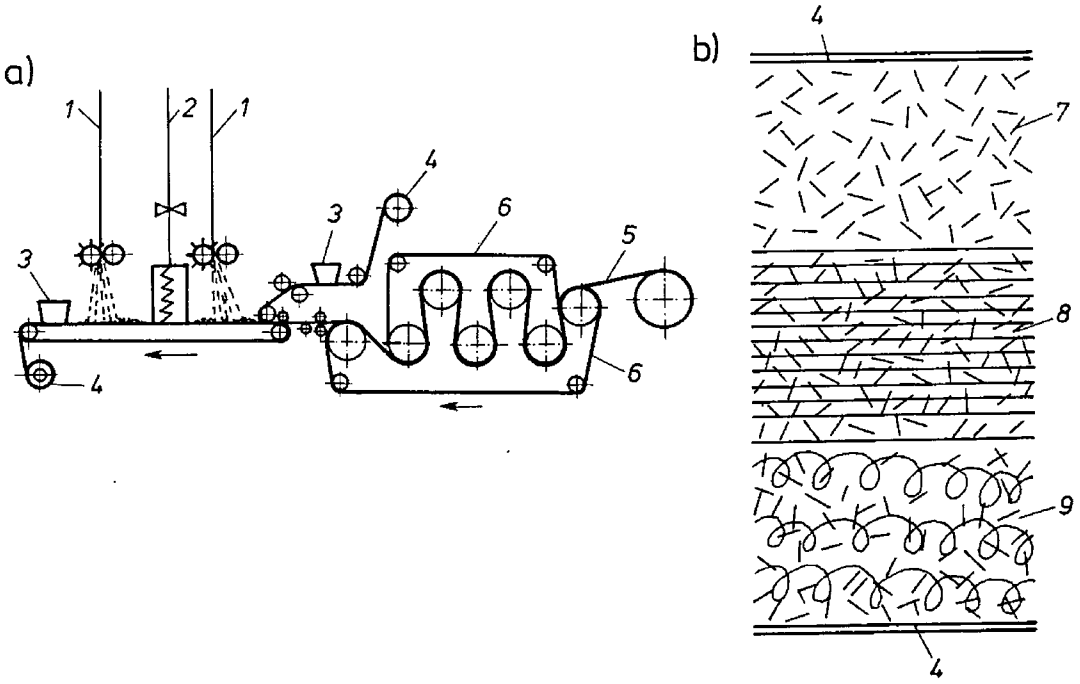
5.5.10. Proces technologiczny laminowania

Ważnymi procesami technologicznymi laminowania są procesy ciągłe prowadzące do otrzymywania tłoczyw arkuszowych z żywicami poliestrowymi. Otrzymywanie tłoczyw arkuszowych zależy od ich budowy. Jeżeli tłoczywo składa się z jednolitej warstwy włókien krótkich ułożonych bezładnie i przesyconych mieszaniną żywicy z potrzebnymi składnikami dodatkowymi, ujętej między dwie ochronne folie polimerowe, to może być otrzymywane w linii technologicznej *laminowania natryskowego*

sekwencyjnego, jak na rys. 5.90. Jeżeli natomiast tłoczywo składa się z kilku warstw, również ujętych między dwie ochronne folie polimerowe, przy czym każda warstwa ma inną budowę, wynikającą ze spełniania odrębnych funkcji w późniejszej wyprasce, czyli gdy tłoczywo odznacza się wzmocnieniem hybrydowym, to jest otrzymywane w innej linii technologicznej — laminowania natryskowego sekwencyjnego i *laminowania specjalnego* — jak na rys. 5.91. Po zwinięciu na wale tłoczyw arkuszowych żywica poliestrowa na ogół podlega zagęszczaniu chemicznemu wskutek reakcji jej grup



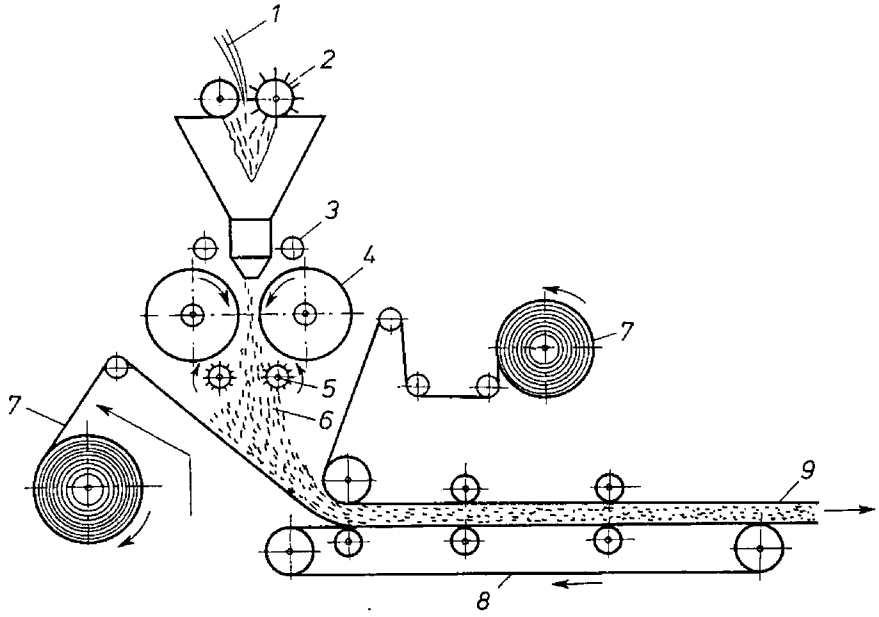
Rys. 5.90. Schemat linii technologicznej laminowania natryskowego sekwencyjnego poliestrowych tłoczyw arkuszowych jednolitych SMC (a) i schemat budowy tłoczyw SMC (b): *1* — włókno do krajania, np. rowing, *2* — zbiornik z mieszaniną żywicy ze składnikami dodatkowymi, *3* — folie PE, *4* — tłoczywo arkuszowe przeznaczone do zwijania, *5* — przenośnik taśmowy, *6* — warstwa tłoczywa z włóknami krótkimi bezładnymi [5.60, 5.61]



Rys. 5.91. Schemat linii technologicznej laminowania natryskowego sekwencyjnego i specjalnego poliestrowych tłoczyw arkuszowych ze wzmocnieniem hybrydowym (a) i schemat budowy tłoczyw (b): *1* — włókno do krajania, np. rowing, *2* — włókno ciągłe do układania liniowego i pętlicowego, *3* — zbiorniki z mieszaniną żywicy ze składnikami dodatkowymi, *4* — folie PE, *5* — tłoczywo arkuszowe przeznaczone do zwijania, *6* — przenośniki taśmowe, *7* — warstwa tłoczywa z włóknami krótkimi bezładnymi, *8* — warstwa tłoczywa z włóknami długimi liniowymi i krótkimi bezładnymi, *9* — warstwa tłoczywa z włóknami długimi pętlicowymi i krótkimi bezładnymi [5.60, 6.61]

funkcyjnych z zagęszczaczem, głównie z MgO, wprowadzanym jako składnik dodatkowy, powodujący wzrost lepkości z początkowego zakresu 1÷5 Pa·s do wartości nawet tysięcy Pa·s [5.61, 5.83]. Po zakończeniu zagęszczania, a przed prasowaniem folie polimerowe mogą być bez trudu zdarte; tłoczywo jest łatwo odkształcalne i miękkie oraz dobrze przepływa pod ciśnieniem w gnieździe formy [5.49]. Tłoczywa te noszą nazwę tłoczyw SMC.

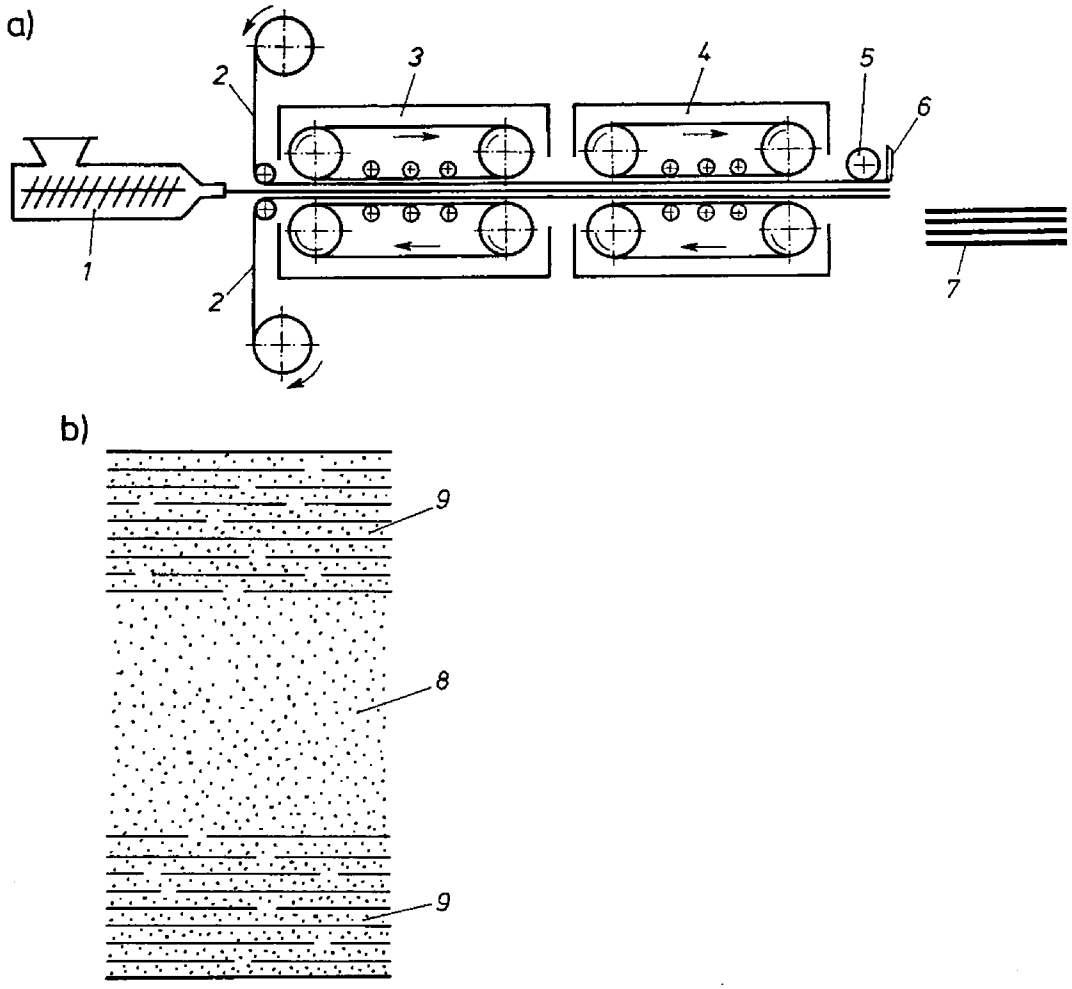
Poliestrowe tłoczywa arkuszowe jednolite mogą być również wytwarzane w linii technologicznej zmodernizowanego laminowania natryskowego klasycznego (rys. 5.92). Przesycanie i mieszanie tłoczywa odbywa się nie w locie w strumieniu powietrza, lecz między specjalnymi walcami. Tłoczywa te odznaczają się zawartością szkła 15÷30% i noszą nazwę tłoczyw TMC. Właściwości wytrzymałościowe tłoczyw TMC są gorsze niż tłoczywa SMC, ale lepsze od właściwości tłoczyw z napełniaczem w postaci mieszaniny krótkich włókien szklanych i proszków (tłoczyw DMC).



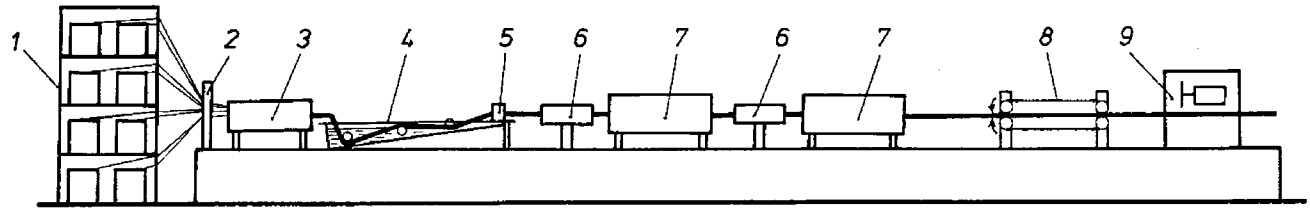
Rys. 5.92. Schemat linii technologicznej zmodernizowanego laminowania natryskowego klasycznego poliestrowych tłoczyw arkuszowych jednolitych TMC: *1* — włókno do krajania, np. rowing, *2* — krajarka, *3* — doprowadzenie żywicy, *4* — walce specjalne, *5* — walce zbierające, *6* — włókno krótkie przesycane i mieszane, *7* — folie, *8* — przenośnik taśmowy, *9* — tłoczywo TMC [5.60, 5.61]

Wspomniane w poprzednim punkcie tłoczywa arkuszowe zespolone TWM składają się z rdzenia, który stanowi tworzywo termoplastyczne (głównie PP, PE, PA i PET), i z naskórka będącego matą (przede wszystkim szklaną z włókien długich) przesyconą danym tworzywem termoplastycznym. Wytwarza się je w liniach technologicznych laminowania powierzchniowego (rys. 5.93). Tłoczywo ma zazwyczaj grubość 1,5÷4 mm i zawartość szkła 25÷40%.

Proces *przeciągania kształtowników* odbywa się zawsze w linii technologicznej i jest ciągły. W ujęciu ogólnym linia technologiczna przeciągania kształtowników składa się z następujących elementów składowych (rys. 5.94): zasobnika włókien — stojaka na szpule (*1*), płyty prowadzącej włókna (*2*), suszarki włókien (*3*), wanny do przesycania włókien spoiwem (*4*), przeciągadła wstępnego (*5*), przeciągadeł zasadniczych (*6*), komory ogrzewanej (*7*), urządzenia odbierającego (*8*) i przecinarki (*9*).



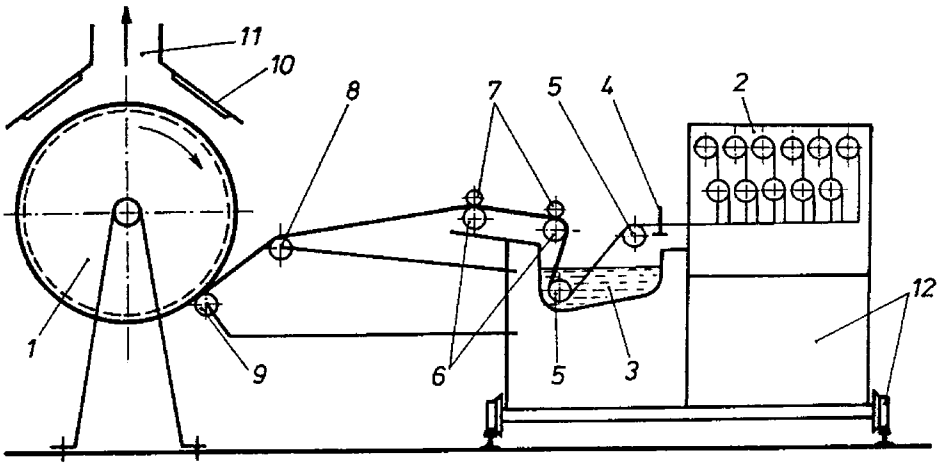
Rys. 5.93. Schemat linii technologicznej laminowania powierzchniowego tłoczyw arkuszowych zespolonych TWM (a) i schemat budowy tłoczyw TWM (b): *1* — wytłaczarka, *2* — maty szklane, *3* — urządzenie nagrzewające, dociskające, przesycające i transportujące, *4* — urządzenie spełniające takie same funkcje, lecz chłodzące, *5* — nóż krążkowy do obcinania brzegów, *6* — nóż liniowy do rozcinania poprzecznego tłoczywa, *7* — płyty tłoczywa, *8* — rdzeń, *9* — naskórek



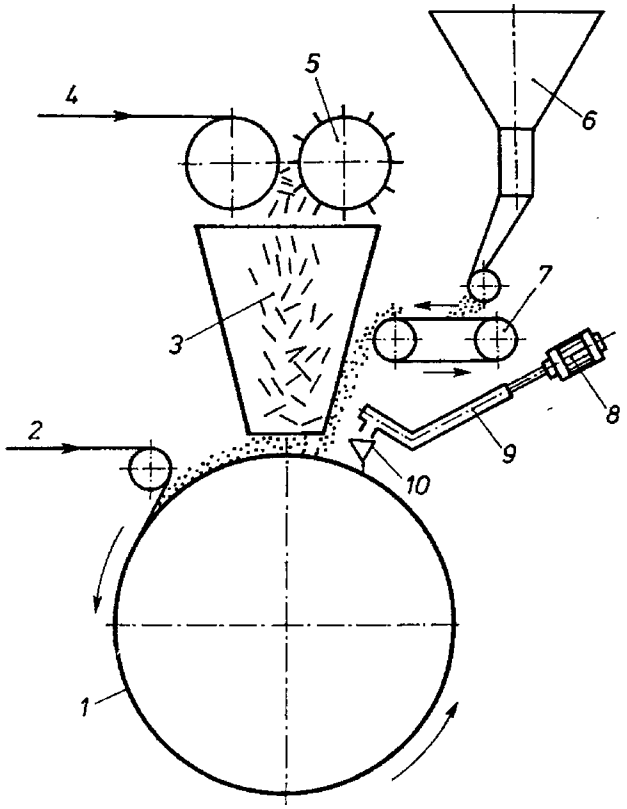
Rys. 5.94. Schemat linii technologicznej przeciągania kształtowników [5.18]; oznaczenia w tekście

Proces nawijania śrubowego zbiorników jest prowadzony na stanowisku technologicznym, którego przykład rozwiązania pokazano na rys. 5.95. Jest to proces cykliczny. Wanna (*3*), listwa (*4*), wałki (*5*, *6* i *7*) wraz z obudową tworzą wspomnianą w rozdz. 3, p. 3.4.2 głowicę do nawijania.

Stosuje się również łącznie *procesy laminowania natryskowego i nawijania*. Z kilku znanych rozwiązań w tym zakresie na wyróżnienie zasługuje rozwiązanie ciągłego laminowania rur poliestrowo-szklanych firmy Drostholm-Products (Dania) (rys. 5.96). Rdzeń jest zbudowany z podłużnic rozpartych od środka pierścieniami; na podłużnice nawija się śrubowo łatwo odkształcalną cienką taśmę stalową o szerokości



Rys. 5.95. Schemat stanowiska technologicznego nawijania śrubowego zbiorników: *1* — rdzeń obrotowy, *2* — zasobnik włókien (stojak na szpule), *3* — wanna do przesycania włókien spoiwem, *4* — listwa prowadząca włókna, *5* — wałki prowadzące, *6* — wałki napinające ze skrobakami, *7* — wałki dociskające, *8* — wałek na ramieniu napinającym, *9* — wałek bezpośrednio dociskający, *10* — promienniki podczerwieni, *11* — wyciąg, *12* — wózek wykonujący ruch postępowo-zwrotny [5.61]

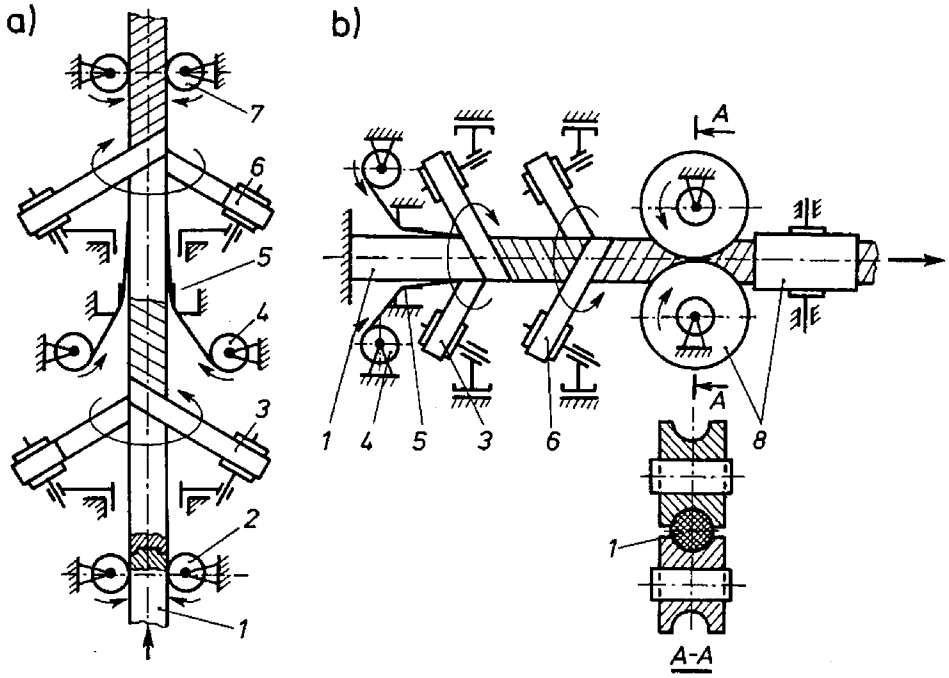


Rys. 5.96. Schemat fragmentu stanowiska technologicznego laminowania natryskowego i nawijania rur: *1* — rdzeń wykonujący ruch obrotowy i liniowy, *2* — włókna długie, np. rowing, lub taśma z tkaniny bądź maty, *3* — włókna krótkie w rynnie spustowej, *4* — włókna długie do krajania, *5* — krajarka, *6* — zasobnik napełniacza proszkowego, *7* — przenośnik taśmowy napełniacza proszkowego, *8* — silnik mieszarki spoiwa, *9* — mieszarka, *10* — głowica do wylewania spoiwa (na rysunku nie pokazano nawijania folii przeciwprzyczepnej)

80 mm, tworząc powierzchnię roboczą rdzenia. Na końcu procesu taśma odwija się do środka i poprzez wnętrze rdzenia wraca do początku, gdzie jest ponownie nawijana na podłużnice. Na rdzeń najpierw nawija się śrubowo folię przeciwprzyczepną, następnie wylewa się na nią spoiwo i bezpośrednio po tym natryskuje włókna krótkie z ewentualnym dodatkiem napełniacza proszkowego, np. proszku kwarcowego,

i z kolei nawija się śrubowo włókna długie, np. rowing, lub taśmę z tkaniny bądź maty. Tak przygotowany zestaw przesuwa się do komory ogrzewanej do temperatury 120°C na określony czas, po czym zestaw wyprowadza się z komory, ochładza wstępnie i odwija taśmę stalową oraz folię przeciwprzyczepną. Zawartość szkła w laminacie waha się w granicach 15÷70%, średnica rury 300÷4000 mm, a grubość ścianki może dochodzić do 25 mm. Wydajność stanowiska technologicznego wynosi 6÷30 m rury na godzinę w zależności od jej średnicy, co stanowi 300÷2000 kg laminatu na godzinę.

Proces nawijania śrubowo-krzyżowego rur i węży zachodzi zawsze w liniach technologicznych, przy czym rozróżnia się następujące przypadki: rdzeń jest związany adhezyjnie z laminatem, jest niezwiązany wyjmowany oraz jest niezwiązany nieruchomy. W pierwszym przypadku wytłacza się rurę, najczęściej z PVC, w linii technologicznej wytłaczania i następnie przeprowadza nawijanie śrubowo-krzyżowe, na przykład rowingiem, w linii technologicznej oplatania. Prędkość przemieszczania się rury wynosi do 0,25÷0,3 m/s [5.30]. W ten sposób wytwarza się rury głównie o małych i średnich średnicach, stosowane w przemyśle chemicznym i spożywczym. Można także wytłaczać wąż z mieszanki gumowej, poddać go procesowi nawijania śrubowo-krzyżowego nićmi i ponownie zastosować wytłaczanie, ale już powlekające mieszanką gumową. Następnie wąż pokrywa się folią metalową (np. ołowianą), nawija na bęben o dużej średnicy, do wnętrza pompuje wodę lub powietrze i po umieszczeniu w komorze prowadzi proces wulkanizowania. Folia metalowa po zdjęciu z węża jest ponownie wykorzystywana. Odcinki węży mają długość do 500 m, średnicę zewnętrzną do 31,5 mm i znajdują ogólne zastosowanie, głównie do wody i powietrza [5.40]. W przypadku, gdy rdzeń jest wyjmowany, rurę można wytwarzać stosując nawijanie śrubowo-krzyżowe i laminowanie wzdłużne, tak jak to przedstawiono na rys. 5.97a.



Rys. 5.97. Fragment linii technologicznej nawijania śrubowo-krzyżowego i laminowania wzdłużnego rur: a) z rdzeniem przedłużanym i wyjmowanym, b) z rdzeniem nieruchomym; *1* — rdzeń, *2* i *7* — wałki napędzające i centrujące, *3* i *6* — nawijanie prawo- i lewoskrętne, *5* — laminowanie wzdłużne, *8* — wałki ciągnące [5.47]

Jeżeli wytłacza się wąż z mieszanki gumowej, to wprowadza się go za pomocą sprężonego powietrza na rdzeń stalowy lub z tworzywa i przeprowadza nawijanie śrubowo-krzyżowe jedno- bądź wielokrotne nićmi i drutem stalowym, a następnie poddaje wytłaczaniu powlekającemu mieszanką gumową. Dalej postępuje się jak poprzednio, z tym że proces wulkanizowania wykonuje się w wannach prostych, a rdzeń się wyjmuje. Odcinki węży mają długość do 40 m i stosuje się je w napędach hydraulicznych do ciśnienia 100 MPa [5.40]. I wreszcie w przypadku, gdy rdzeń jest nieruchomy, rurę można wytwarzać według schematu podanego na rys. 5.97b.

5.5.11. Proces technologiczny kalandrowania

Kalandrowanie, ze względu na swoją istotę, stosuje się wyłącznie do wytwarzania jednakowych folii w znacznych ilościach. Procesy technologiczne kalandrowania prowadzi się w liniach technologicznych. Wydajność linii technologicznych dochodzi do kilku tysięcy kilogramów folii na godzinę, ale koszty inwestycyjne są bardzo wysokie. Linie technologiczne kalandrowania dzielą się na linie do kalandrowania zwykłego, tłoczącego (moletującego), nakładającego i specjalnego.

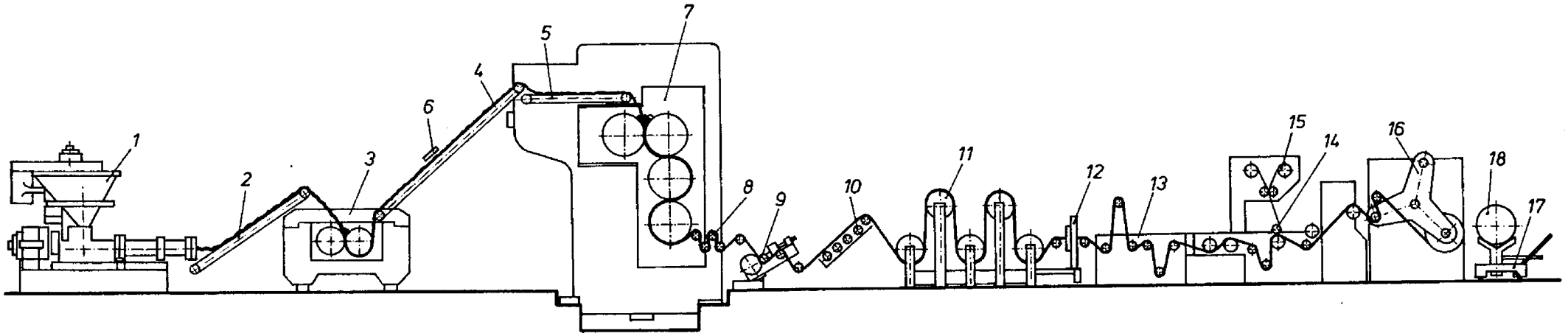
Linie technologiczne kalandrowania tłoczącego

Jedno z rozwiązań linii technologicznej kalandrowania wyciskającego PVC twardego przedstawiono na rys. 5.98. Linia składa się z: wytłaczarki (*1*) do wstępnego uplastyczniania, przenośnika taśmowego (*2*), walcarki (*3*) do uplastyczniania ostatecznego, przenośników taśmowych (*4*) i (*5*), wykrywacza metali (*6*), kalandra (*7*), urządzenia (*8*) odbierającego folię — wałków odbierających, urządzenia (*9*) do tłoczenia wzoru, urządzenia (*10*) do powiększenia orientacji molekularnej folii, urządzenia (*11*) do wstępnego ochładzania folii — wałków chłodzących, urządzenia (*12*) do bezstykowego pomiaru grubości folii, urządzenia (*13*) do ochładzania ostatecznego folii — wałków chłodzących, noży krążkowych (*14*) do obcinania brzegów folii, urządzenia (*15*) do zwijania obciętych brzegów folii, urządzenia (*16*) do zwijania folii, wózka (*17*) do transportowania zwojów folii (*18*).

W innym rozwiązaniu [5.106] tworzywo jest uplastyczniane wstępnie za pomocą ugniatarki. Znane są również rozwiązania, np. firmy Berstorff (Niemcy), w których kalader jest zaopatrywany tworzywem uplastycznianym tylko w wytłaczarce planetarnej. W każdym przypadku, ta część przenośnika taśmowego, która znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie walców kalandra (nad pierwszą szczeliną międzywalcową), wykonuje ruch wahadłowy o największej amplitudzie równej długości części roboczej walców kalandra, co powoduje równomierne rozprowadzenie plastyfikatu. Niekiedy przenośnik taśmowy (*5*) bywa zbędny.

Po zdjęciu z kalandra gorąca folia jest poddawana procesowi tłoczenia wzoru. Odbywa się to za pomocą układu dwu walców, z których jeden, nazywany *walcem tłoczącym lub moletującym*, ma powierzchnię walcową ukształtowaną tak, że odpowiada ona negatywowi wzoru, a drugi jest *walcem dociskającym* o tworzącej prostej, wykonany z elastomeru.

Folię można poddawać nie tylko procesowi orientowania molekularnego, ale również ulepszaniu cieplnemu (rozdz. 2, p. 2.5.1). W celu zwiększenia intensywności



Rys. 5.98. Schemat linii technologicznej kalandrowania tłoczącego PVC twardego firmy Thiriau (Belgia) o wydajności 650 kg/h (grubość folii 0,6 mm, szerokość 2 m); oznaczenia w tekście

ochładzania folii, wałki są chłodzone wodą, co jednocześnie daje możliwość zmniejszenia liczby wałków chłodzących. Bezstykowy pomiar grubości folii, np. odbywający się na zasadzie absorpcji promieniowania β, służy głównie do regulacji szerokości szczeliny ostatniej pary walców kalandra. Brzegi folii są obcinane nożami krążkowymi: w przypadku folii zmiękczonej zazwyczaj na ostatnim walcu kalandra, a w przypadku folii twardej — dopiero po jej ochłodzeniu. W pierwszym przypadku tworzywo z obciętych brzegów może być ponownie wprowadzane bezpośrednio do pierwszej szczeliny międzywalcowej kalandra.

Linie technologiczne kalandrowania zwykłego

Linie te różnią się od linii technologicznych kalandrowania tłoczącego tym, że nie mają urządzeń do tłoczenia wzoru. Jeżeli chce się otrzymać folię o powierzchni gładkiej, to powierzchnie ostatnich dwu walców są zazwyczaj chromowane i polerowane. Ale folie takie mogą łatwo ulegać blokingowi. Jeżeli natomiast chce się otrzymać folię o powierzchni matowej i trudno ulegającej blokingowi, to powierzchniom dwu ostatnich walców nadaje się bezładną (bezkierunkową) strukturę geometryczną nierówności powierzchni, np. poddaje się je obróbce strumieniowo-ściernej.

Linie technologiczne kalandrowania nakładającego

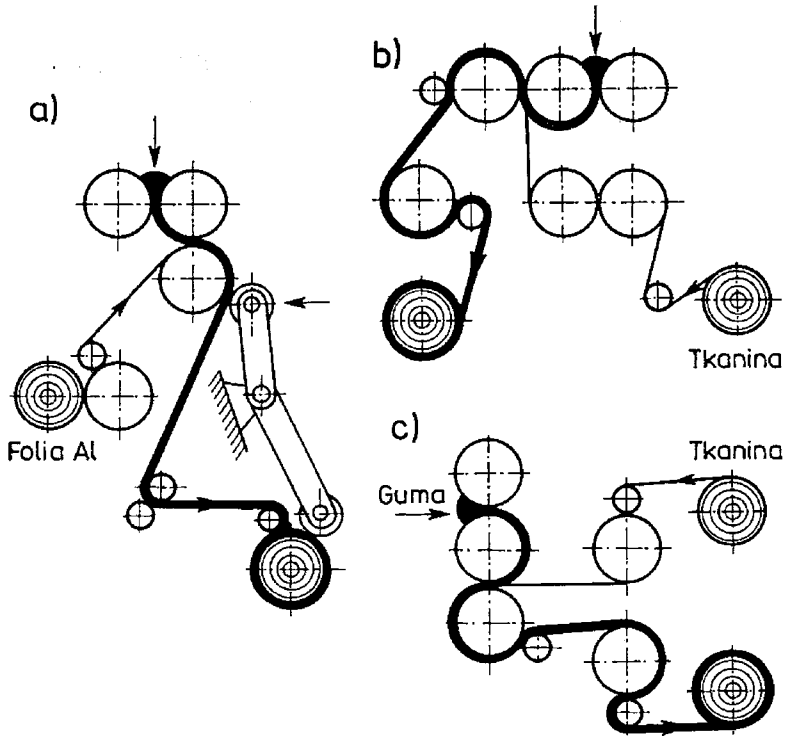
Istotą linii technologicznych kalandrowania nakładającego jest to, że następuje w nich łączenie adhezyjne folii w stanie plastycznym z warstwami innych materiałów, będących w stanie stałym, np. folii z różnych tworzyw wielkocząsteczkowych (np. folii PE) oraz z różnych metali (np. z Al), tkanin z różnych materiałów, jak również papieru (tabl. 5.21). Kalandrowanie nakładające może odbywać się w rozmaitych układach;

Tablica 5.21

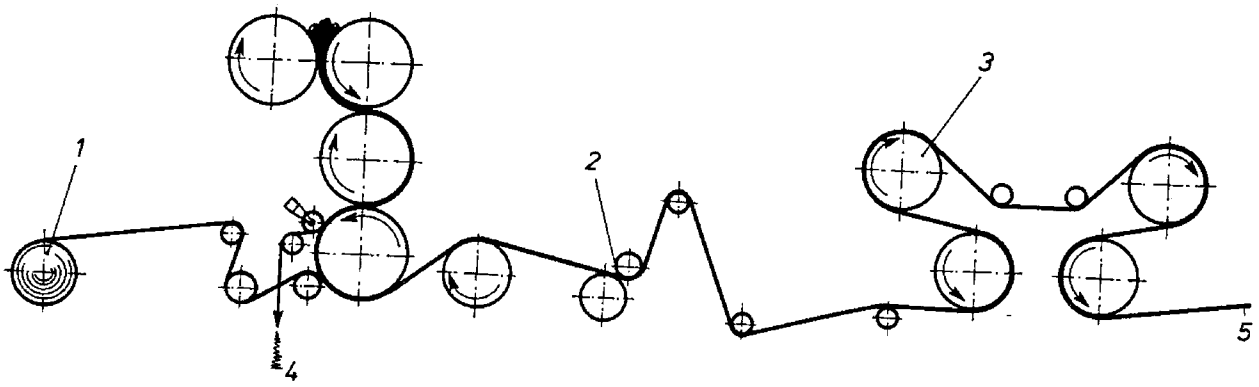
Niektóre materiały stosowane w kalandrowaniu nakładającym

Materiały łączone		Przeznaczenie
tworzywo	inny materiał	
Polichlorek winylu zmiękczony	papier	tapety ścienne do budownictwa
Polichlorek winylu zmiękczony	tkanina bawełniana lub polimerowa	materiał do wytwarzania toreb, teczek itp.
Polietylen	folia aluminiowa	materiał do opakowań
Guma z różnych kauczuków	tkanina bawełniana lub polimerowa	taśmy przenośników, do przekładni
Utleniony olej lniany	tkanina z juty	wykładziny podłogowe (linoleum)

niektóre z nich pokazano na rys. 5.99. Gdy łączy się dwa materiały, wówczas występuje kalandrowanie nakładające — zdwajanie, gdy łączy się trzy materiały — kalandrowanie nakładające — potrajanie itd. Szczególne znaczenie przypisuje się zdwajaniu folii PVC i papieru, w celu otrzymywania tapet ściennych do budownictwa (rys. 5.100), oraz zdwajaniu lub potrajaniu folii polimerowych, ale jest ono wypierane przez bardziej wydajne i ekonomiczne współwytłaczanie folii płaskiej i współwytłaczanie z rozdmuchiwaniem folii rurowej.



Rys. 5.99. Przykłady układów kalandrowania nakładającego — zdwajania: a) folia PE oraz folia Al, b) folia PVC oraz tkanina, np. bawełniana, c) folia gumowa oraz tkanina, np. polimerowa



Rys. 5.100. Schemat linii technologicznej kalandrowania nakładającego (zdwajania) folii PVC zmiękczonego i papieru, w celu otrzymywania tapet ściennych do budownictwa: *1* — zwój papieru, *2* — wyciskanie wzoru na tapecie, *3* — walce chłodzące, *4* — obcięte brzegi folii, *5* — tapeta gotowa do zwijania

Linie technologiczne kalandrowania specjalnego

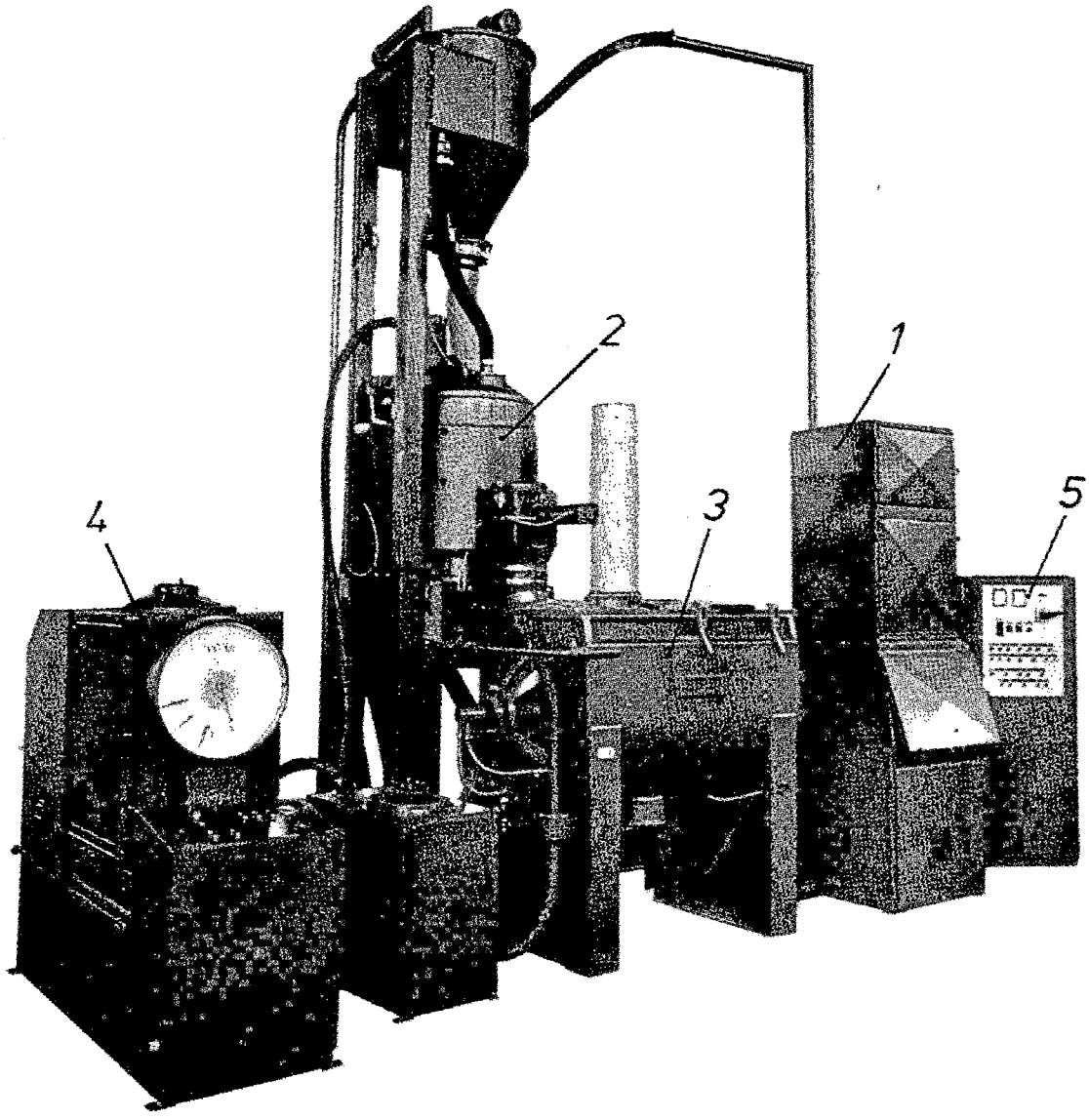
W liniach technologicznych kalandrowania specjalnego folia powstaje nie tylko w procesie kalandrowania, jak we wszystkich dotychczas przedstawionych liniach, ale również w innym procesie przetwórstwa złączonym z kalandrowaniem, głównie w procesie wytłaczania. Na przykład [5.129] współwytłacza się folię 6-warstwową, a następnie bezpośrednio po tym poddaje się ją kalandrowaniu za pomocą kalandra trójwalcowego, ochładza i zwija. Wydajność linii technologicznej kalandrowania specjalnego (kalandrowania ze współwytłaczaniem) firmy Amut (Włochy) wynosi 600 kg/h przy folii o grubości 1 mm i szerokości 1 m. Tak otrzymana folia jest przeznaczona do kształtowania, przede wszystkim próżniowego, w celu otrzymania pojemników na produkty spożywcze.

5.5.12. Proces technologiczny mieszania

W przypadku, gdy mieszanina stanowi materiał bezpośrednio wejściowy do innych procesów przetwórstwa, mieszanie jest jednym z procesów składowych zachodzących w linii bądź na stanowisku technologicznym. Na przykład tak jest w liniach technologicznych kalandrowania.

Gdy natomiast mieszanina stanowi materiał pośrednio wejściowy do innych procesów przetwórstwa, wówczas mieszanie odbywa się na ogół w oddzielnych liniach lub na stanowiskach technologicznych mieszania.

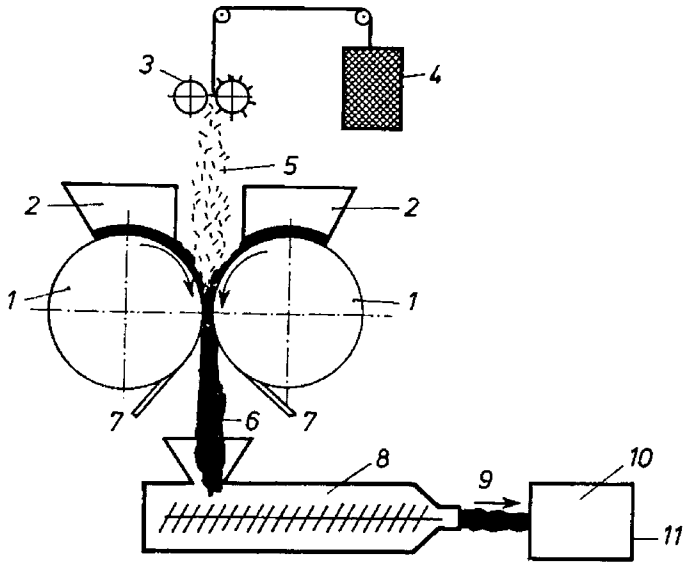
Na rysunku 5.101 przedstawiono przykładowo linię technologiczną mieszania składników w stanie stałym składającą się z: zasobnika (*1*), mieszarki (*2*), urządzenia chłodzącego (*3*) i urządzenia dozującego (*4*). Transportowanie tworzywa pomiędzy elementami składowymi linii odbywa się pneumatycznie, a linia jest sterowana komputerowo (5).



Rys. 5.101. Wygląd linii technologicznej mieszania firmy Amut (Włochy); oznaczenia w tekście

Tłoczywa proszkowe, suche [5.60] otrzymuje się poprzez zmieszanie stopionej żywicy, napełniacza zazwyczaj proszkowego, środka barwiącego, smarującego i innych składników dodatkowych oraz rozdrobnienie zestalonego materiału. Tradycyjnie stosuje się mieszanie walcowe, czyli walcowanie, cykliczne lub ciągłe, i następnie rozdrabnianie, ale można także stosować rozwiązanie nowsze [5.112], polegające na połączeniu tych operacji w kulowym młynie wibracyjnym.

Tłoczywa w stanie plastycznym, miękkie [5.60] otrzymuje się również wskutek zmieszania, często za pomocą mieszarek zetowych. W przypadku jednak, gdy napełniaczem obok proszków są także włókna krótkie, podczas mieszania nieuchronnie zachodzi nadmierne rozdrabnianie włókien i dlatego efektywne jest stosowanie walcowania i mieszania ślimakowego — wytłaczania (rys. 5.102), co istotnie ogranicza rozdrabnianie włókien.



Rys. 5.102. Schemat otrzymywania tłoczyw poliestrowych wzmacnianych krótkim włóknem szklanym: *1* — walce, *2* — zbiorniki mieszaniny żywicy ze składnikami dodatkowymi, *3* — krajarka włókna, *4* — zwój włókna, np. rowingu, *5* — włókno pocięte, *6* — tłoczywo po wymieszaniu wstępnym, *7* — listwy zgarniające, *8* — wytłaczarka ślimakowa, *9* — tłoczywo po wymieszaniu ostatecznym, *10* — granulator i segregator, *11* — tłoczywo zgranulowane [5.73]

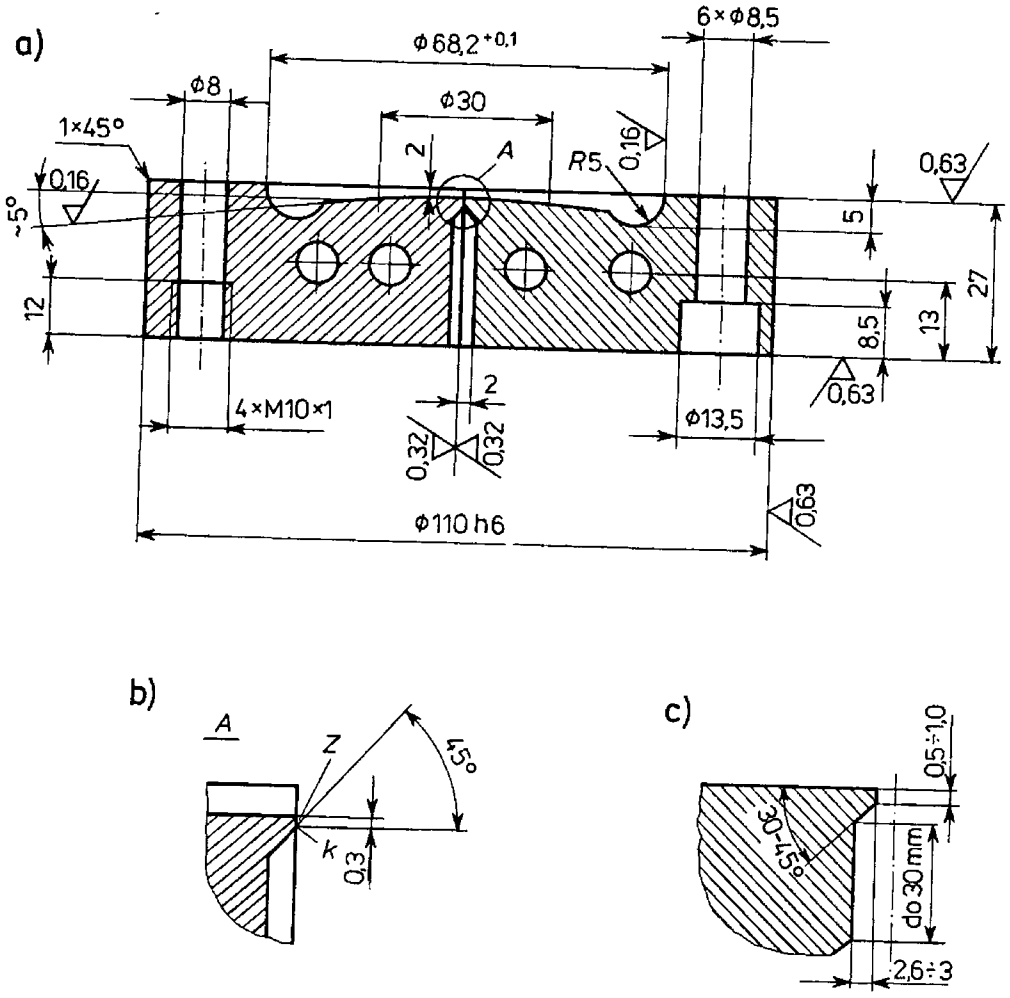
5.6. Procesy technologiczne PFC I i PCF

Procesy technologiczne przetwórstwa fizyczno-chemicznego I rodzaju (PFC I) i procesy technologiczne przetwórstwa chemiczno-fizycznego (PCF) obejmują, podobnie jak to podano w punkcie poprzednim, nie tylko procesy zgodne z metodami przetwórstwa przedstawionymi w rozdziałach 2 i 4, ale także procesy będące połączeniem tych procesów z procesami przebiegającymi według innych metod przetwórstwa, jak również obróbki. Ze względu na ustalony zakres niniejszego rozdziału będą omówione te procesy technologiczne, które mają istotne znaczenie i które zachodzą w typowych liniach i na typowych stanowiskach technologicznych.

5.6.1. Proces technologiczny zgrzewania

Na ogół otrzymywanie złącza zgrzewanego w procesie technologicznym zgrzewania nie jest celem samym w sobie, jak np. otrzymywanie wypraski wtryskowej w procesie wtryskiwania. Zazwyczaj zgrzewanie stanowi jedną z istotnych operacji w innych procesach technologicznych, w tym również nie związanych z przetwórstwem.

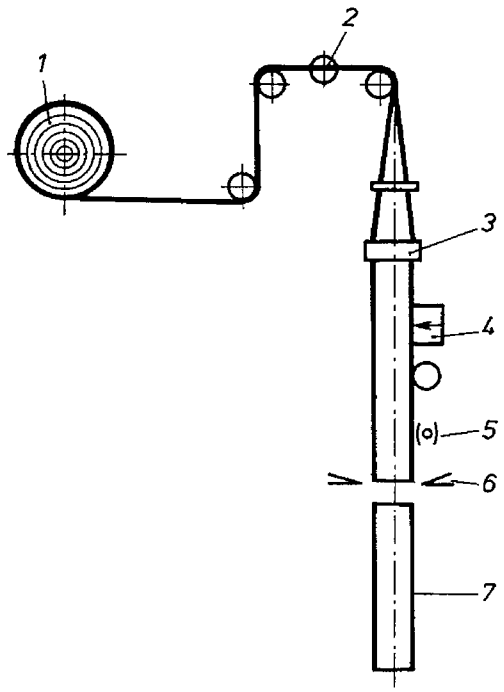
Przykładem występowania zgrzewania jako ważnej operacji w procesie technologicznym przetwórstwa może być zgrzewanie podczas wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie (p. 5.5.3). Otóż po wprowadzeniu wytłaczanego węża z tworzywa w stanie plastycznym do gniazda formy rozdmuchowej, w czasie zamykania formy jest on zgrzewany i odcinany. Zachodzi to wskutek specjalnego ukształtowania powierzchni podziału formy w obrębie szyjki i dna pojemnika. Na rysunku 5.103 są przedstawione rozwiązania konstrukcyjne formy rozdmuchowej w obrębie dna pojemnika. Powierzchnie oznaczone na rysunku literą Z odpowiadają powierzchniom nagrzanych listew w zgrzewaniu kontaktowym (rozdz. 2, p. 2.1.1), a oddzielenie odpadu technologicznego węża następuje na krawędziach zewnętrznych tych powierzchni oznaczonych literą k.



Rys. 5.103. Rozwiązanie konstrukcyjne formy rozdmuchowej w obrębie dna pojemnika: a) przekrój poprzeczny według dokumentacji konstrukcyjnej OBR Metalchem w Toruniu, b) fragment połowy elementu powodującego zgrzewanie i odcinanie w przypadku węża PVC twardego, c) w przypadku węża PE [5.5]

Innym przykładem występowania zgrzewania w podobnej roli jest zgrzewanie w czasie wytwarzania tub, opisane w p. 5.5.8. Tuby mogą być wykonywane również z laminatu i wówczas są one zgrzewane pojemnościowo wzdłuż swej długości (rys. 5.104).

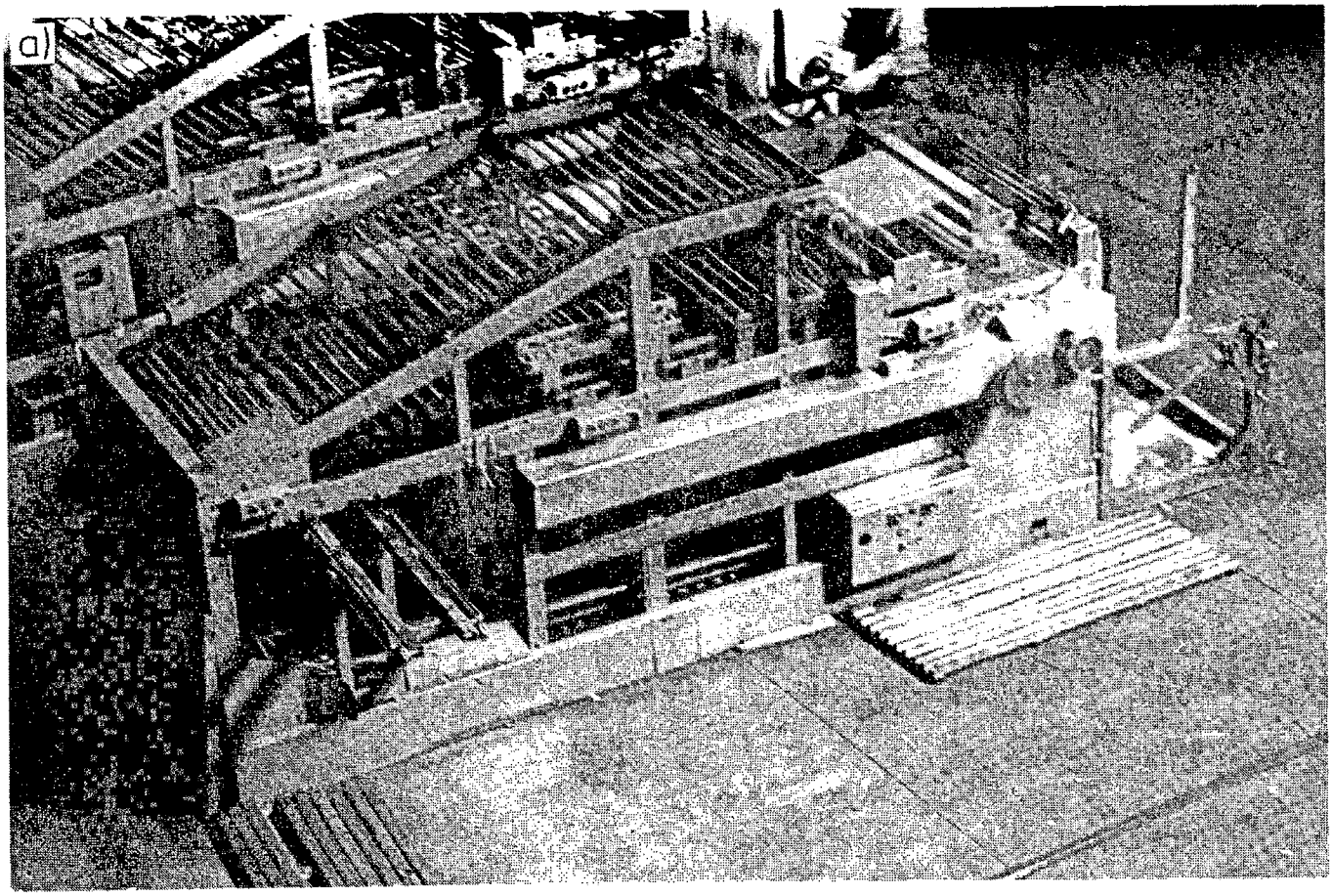
Na rysunku 5.105 przedstawiono urządzenie do otrzymywania opakowaniowych worków płaskich, z jednej strony otwartych, z folii PE rurowej, grubej, uzyskanej w procesie technologicznym wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym (p. 5.5.2),

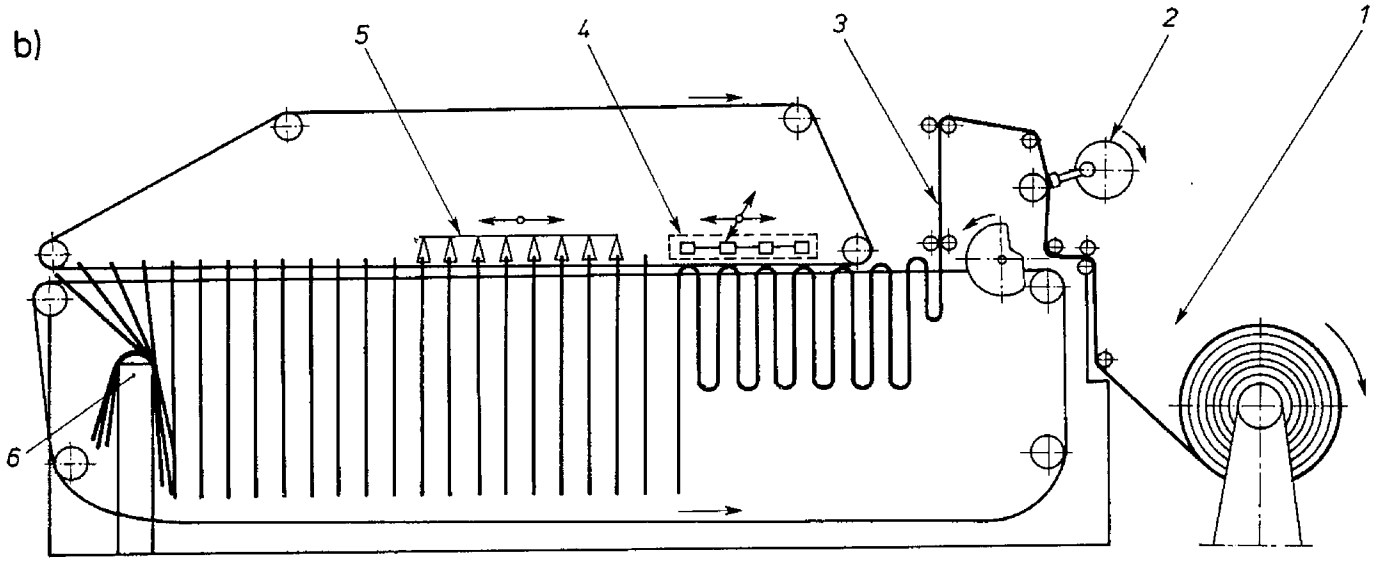


Rys. 5.104. Schemat wytwarzania korpusu tub laminatowych: *1* — zwój laminatu, *2* — noże krążkowe do obcinania boków laminatu na żądany wymiar, *3* — pierścień formujący rurę, *4* — zgrzewarka pojemnościowa, *5* — fotokomórka, *6* — nóż odcinający obrotowy, *7* — korpus tuby [5.125]

składające się z zespołów: podającego (*1*), dziurkującego — perforującego (*2*), pętlującego (*3*), rozcinającego (*4*), zgrzewającego (*5*) i odbierającego (*6*). Zespół zgrzewający (rys. 5.106) może się składać z kilku par listew (*1*) do zgrzewania, np. kontaktowego, mocowanych przez łącznik (*4*) do belki głównej (*6*). Zwieranie listew odbywa się za pomocą napędzanych pneumatycznie zwieraczy (*7*). Cykl procesu zgrzewania rozpoczyna się od opuszczenia zespołu zgrzewającego i zwarcia nagrzanych listew na końcach odcinków folii (*2*) wystających nad trzymającymi je belkami transporterów (*3*) i (*5*). W tym położeniu zespół zgrzewający przesuwa się zgodnie z kierunkiem przemieszczania folii do położenia krańcowego, w którym następuje rozwarcie listew i uniesienie zespołu zgrzewającego do góry. Ruchy podnoszenia, opuszczania, roboczy i powrotny zespołu zgrzewającego odbywają się za pomocą specjalnej przekładni. Przy ośmiu parach listew wydajność wynosi od 3500 do 4500 zgrzein na godzinę.

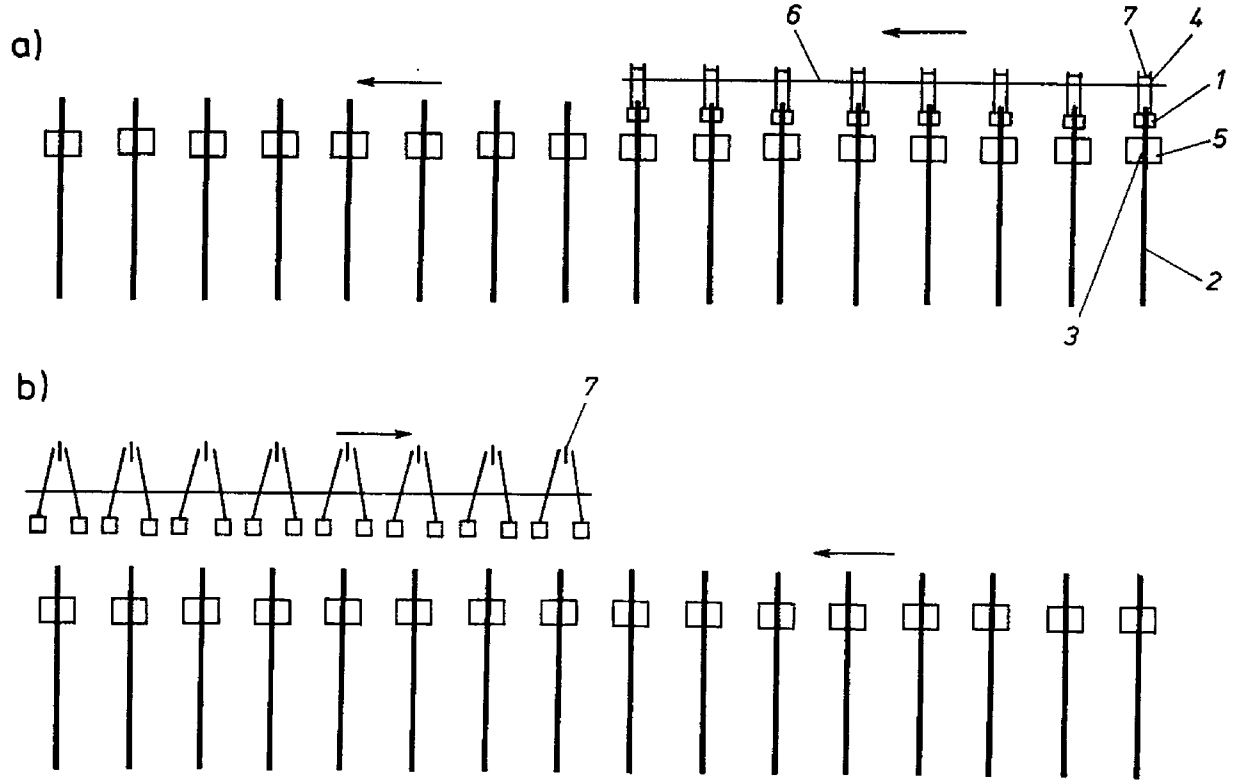
Przykładem występowania zgrzewania w procesie technologicznym nie związanym z przetwórstwem może być zgrzewanie w celu pakowania. Rozpowszechnione jest pakowanie, poprzez owinięcie obwolutowe (częściowe) zestawu przedmiotów, w folie



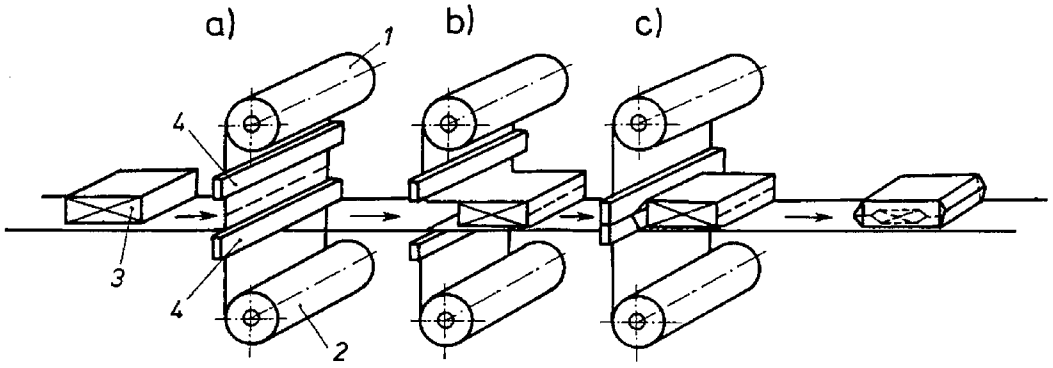


Rys. 5.105. Urządzenie firmy Breda–Renka (Holandia) do otrzymywania worków opakowaniowych z folii rurowej uzyskanej w procesie technologicznym wytłaczania z rozdmuchiwaniem: a) wygląd ogólny, b) schemat działania; oznaczenia w tekście

termokurczliwe, uzyskane np. w procesie technologicznym wytłaczania z rozdmuchiwaniem swobodnym. Jedno z rozwiązań linii technologicznej służącej do tego celu przedstawiono na rys. 5.107. Folie z obu poziomo usytuowanych zwojów, górnego (*1*) i dolnego (*2*), są na początku cyklu połączone zgrzeiną poprzeczną. Zestaw



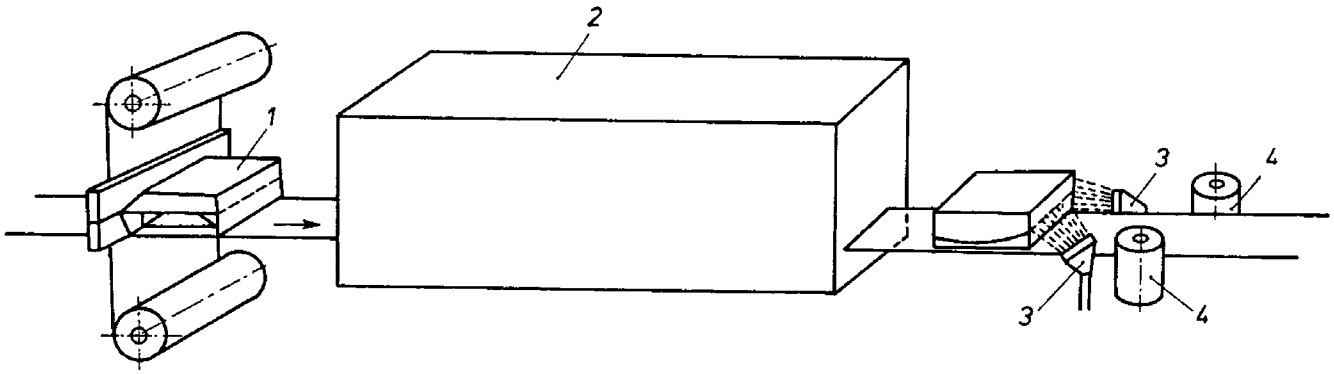
Rys. 5.106. Schemat przebiegu procesu technologicznego zgrzewania jako jednej z operacji wykonywanej w urządzeniu pokazanym na rys. 5.105: a) faza zgrzewania, b) faza ruchu powrotnego zespołu zgrzewającego; oznaczenia w tekście



Rys. 5.107. Schemat linii technologicznej zgrzewania folii do pakowania poprzez owinięcie obwolutowe: a), b), c) — poszczególne fazy cyklu [5.63]; oznaczenia w tekście

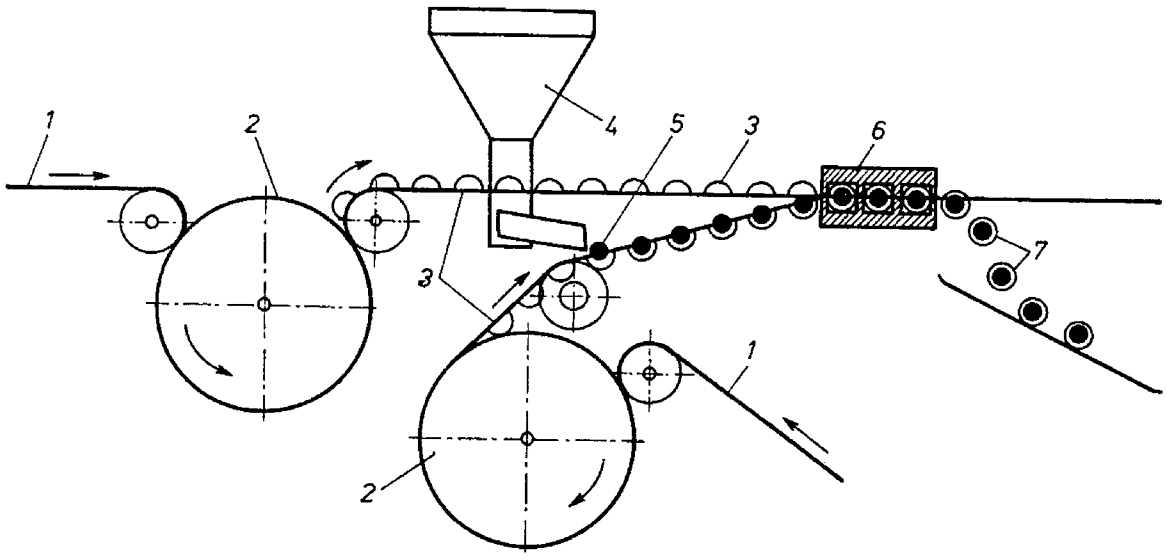
pakowanych przedmiotów (*3*) jest przemieszczany na przenośniku taśmowym w kierunku folii, przez co folia owija się dookoła niego i jednocześnie odwija ze zwojów. Po minięciu listew zgrzewających (*4*) zgrzewarki impulsowej, zestaw jest unieruchamiany, a górna listwa, dzięki specjalnej konstrukcji układu listew (rys. 2.34), opuszczając się powoduje jednocześnie zgrzewanie impulsowe folii w dwu równoległych zgrzeinach i jej rozdzielenie pomiędzy zgrzeinami. Utworzona w ten sposób obwoluta zostaje odcięta, a dwie folie ponownie połączone i przygotowane do następnego owinięcia. Następnie opakowanie w wyniku popychania przez kolejny zestaw jest wprowadzane na przenośniku taśmowym do tunelu ogrzewanego, w którym następuje kurczenie się folii pod wpływem ciepła i dopasowanie się do kształtu zestawu [5.76]. W rezultacie uzyskuje się opakowany zestaw z częściowo otwartymi bokami. Otwory w bokach

mogą być wykorzystywane jako uchwyty, co ułatwia ręczne manipulowanie w transporcie i magazynowaniu. W przypadku jednak konieczności owinięć całkowitych, zestaw bezpośrednio po opuszczeniu tunelu jest przeprowadzany pomiędzy dwoma dyszami nadmuchującymi ogrzane powietrze pod takim kątem, że dolna część folii występująca poza krawędź zestawu unosi się i dotyka jego boków. Znajdujące się dalej obracające wałki dociskają części nagrzanej folii do siebie, powodując ich zgrzewanie (rys. 5.108).



Rys. 5.108. Schemat linii technologicznej pakowania poprzez owinięcie całkowite w folię termokurczliwą: *1* — zestaw pakowanych przedmiotów w owinięciu obwolutowym (rys. 5.107), *2* — tunel ogrzewany, *3* — dysze nadmuchujące ogrzane powietrze, *4* — wałki dociskające

Szeroko stosuje się również pakowanie materiałów sypkich, ciastowatych i ciekłych, szczególnie w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym oraz chemicznym, gdzie często jedna część opakowania (korpus pojemnika) po napełnieniu jest zamykana poprzez zgrzewanie z drugą częścią (wiekiem pojemnika). Różnorodność spotykanych rozwiązań jest tu bardzo duża. Na rysunku 5.109 przedstawiono przykładowo jedno



Rys. 5.109. Schemat urządzenia do pakowania materiałów sypkich o stosunkowo dużych rozmiarach elementów pakowanych: *1* — folie opakowaniowe, *2* — maszyny do rotacyjnego rozciągania próżniowego, *3* — kształtki, tj. korpus i wieko pojemnika, *4* — zasobnik z materiałem pakowanym, *5* — wprowadzanie elementu pakowanego do korpusu pojemnika, *6* — zgrzewanie korpusu z wiekiem z rozdzielaniem zamkniętych pojemników, *7* — pojemniki zamknięte

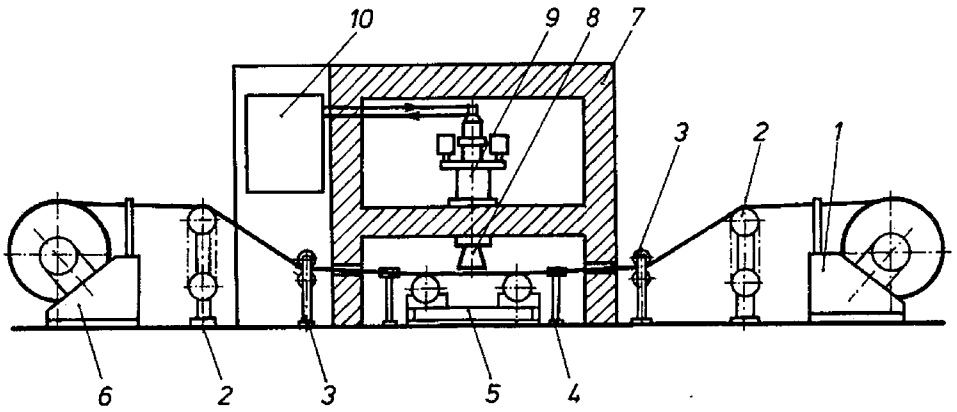
z nich, do pakowania materiałów sypkich o stosunkowo dużych rozmiarach elementów pakowanych, gdzie korpus i wieko pojemnika są geometrycznie zbliżone do siebie. Przy pakowaniu materiałów ciekłych często wieko stanowi folia płaska.

Proces technologiczny zgrzewania oraz procesy z nim związane mogą odbywać się w warunkach sterylnych i wówczas zazwyczaj stosuje się folie wielowarstwowe. Na przykład na korpusy pojemnika stosuje się folię sześciowarstwową (licząc od strony zewnętrznej, nie stykającej się z materiałem pakowanym): PS (1,35 mm), klej (0,05 mm), PVDC (0,1 mm), klej (0,025 mm), PE (0,1 mm) i PP (0,05 mm), natomiast na wieka folię trójwarstwową: aluminium/PE/PP. Przed użyciem z obu folii zdziera się warstwę PP, traktuje się ją bowiem jako warstwę ochronną, następnie folię na korpusy rozciąga się próżniowo i otrzymane korpusy napełnia oraz zgrzewa z wiekami — wszystko w warunkach sterylnych z wydajnością od 14 000 do 22 000 napełnionych małych pojemników na godzinę [5.88].

5.6.2. Proces technologiczny ulepszania radiacyjnego

Proces technologiczny ulepszania radiacyjnego przedmiotów z tworzyw odbywa się w liniach technologicznych, działających w sposób ciągły. Liniowy akcelerator elektronów (rozdz. 2, p. 2.5.2) oraz niektóre urządzenia uzupełniające linii technologicznych znajdują się w specjalnym bunkrze, a pozostałe elementy składowe linii oraz urządzenia sterowania i regulacji — poza bunkrem. W przypadku ulepszania radiacyjnego wytłoczyn, np. rur, węży, wstęg, folii, napromienianie zachodzi w ruchu bezpośrednio pod akceleratorem (rys. 5.110), natomiast przy ulepszaniu przedmiotów bryłowych, głównie różnych wyprasek, napromienianie zachodzi również w ruchu, ale przedmioty umieszcza się w pojemnikach, a te na przesuwającym się przenośniku taśmowym lub innym.

Napromienioną rurę można po rozdzieleniu na odcinki nagrzać, po nagrzaniu rozdmuchać w formie i następnie ochłodzić [5.43]. Tak ulepszona rura odznacza się pamięcią kształtu — jest termokurczliwa; po ponownym nagrzaniu (w przypadku rur



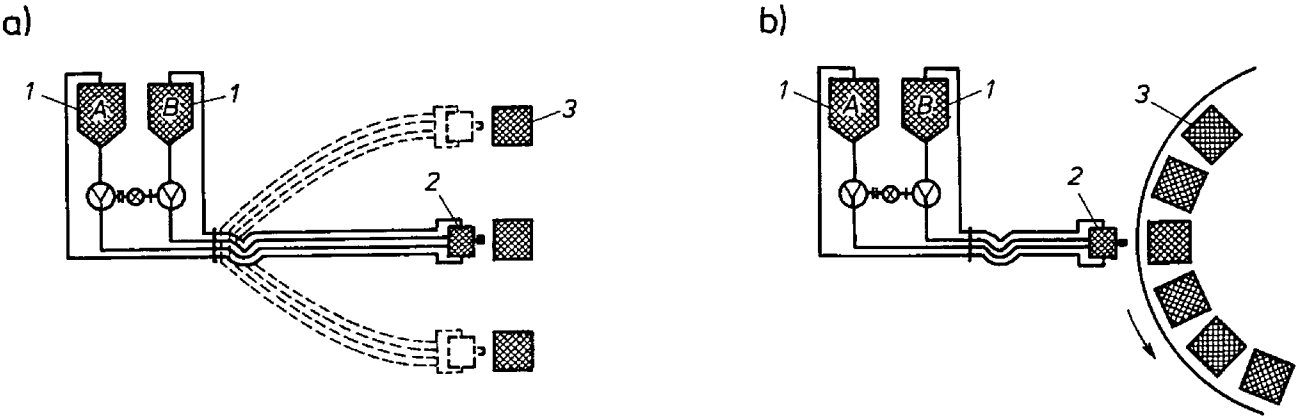
Rys. 5.110. Schemat linii technologicznej do ciągłego ulepszania radiacyjnego rur lub wstęg bezpośrednio pod akceleratorem: *1* — urządzenie podające, *2* — kompensator długości, *3* — rolki prowadzące, *4* — stojaki prowadzące, *5* — urządzenie przewijająco-naprowadzające, *6* — urządzenie odbierające, *7* — bunkier, *8* — tubus, z którego są wyprowadzane elektrony, *9* — akcelerator elektronów, *10* — szafa sterownicza [5.43]

z PE do 140÷180°C) powraca do wymiarów i kształtu sprzed procesu ulepszania. Rury o takich właściwościach stosuje się w wielu gałęziach przemysłu. Podobnie postępuje się w przypadku wstęg [5.57], a więc wstęgi nagrzewa się, rozciąga i ochładza. Wstęgami termokurczliwymi owija się różne instalacje rurowe, następnie nagrzewa wstęgę, powodując jej obkurczanie i szczelne przyleganie do rury.

5.6.3. Proces technologiczny formowania PUR

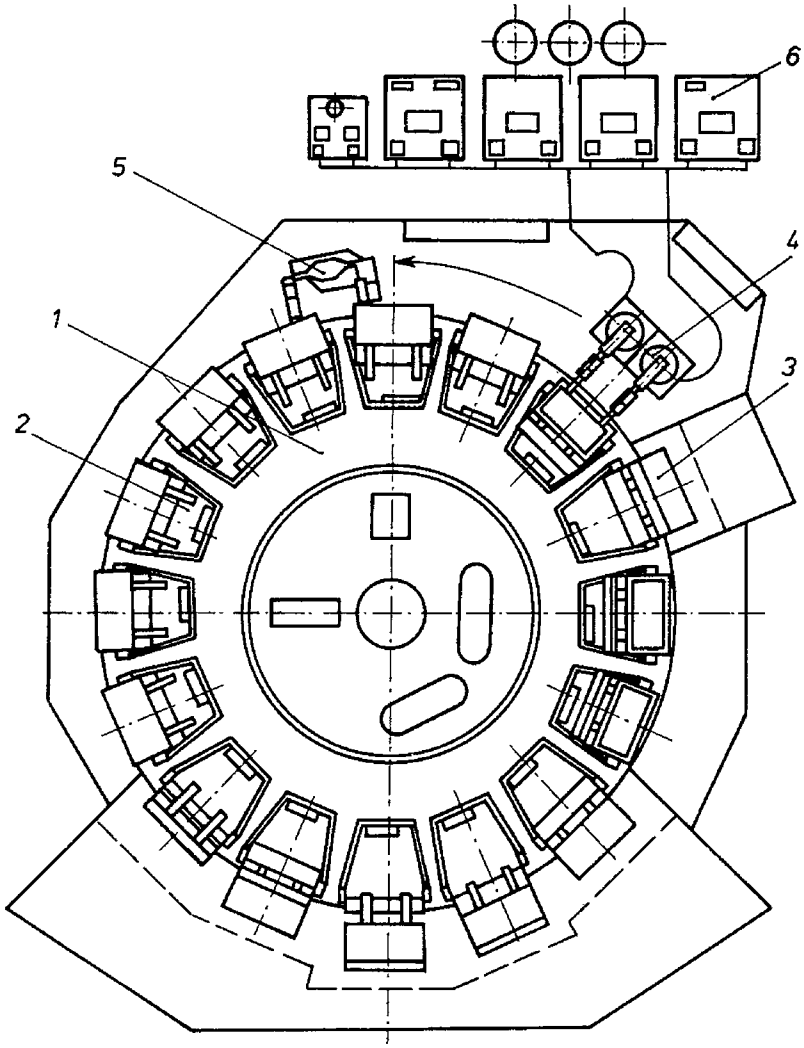
Proces technologiczny formowania polimeryzacyjnego poliuretanów (rozdz. 4, p. 4.1.1) może być cykliczny lub ciągły. Odbywa się on w liniach technologicznych, które dzielą się umownie w zależności od charakteru procesu oraz w zależności od ruchu form przetwórczych na stacjonarne i ruchome.

Linie technologiczne do pracy cyklicznej, stacjonarne (rys. 5.111a) obejmują głównie kilka lub kilkanaście nieruchomych form oraz kilka bądź kilkanaście przenośnych głowic mieszających lub częściej głowice wbudowane w formy, do których podłącza się instalacje z mieszaniną reaktywnych składników PUR. Są one rzadko stosowane. Linie technologiczne do pracy cyklicznej, ruchome (rys. 5.111b) zawierają kilkanaście lub kilkadziesiąt ruchomych form oraz jedną lub kilka stacjonarnych głowic. Ze względu na ruch podstawowy form linie te dzielą się na karuzelowe, liniowo-nawrotne i inne.



Rys. 5.111. Istota działania linii technologicznych cyklicznego formowania polimeryzacyjnego PUR: a) stacjonarnej, b) ruchomej; *1* — zbiorniki zestawów składników, *2* — głowica mieszająca, *3* — formy przetwórcze

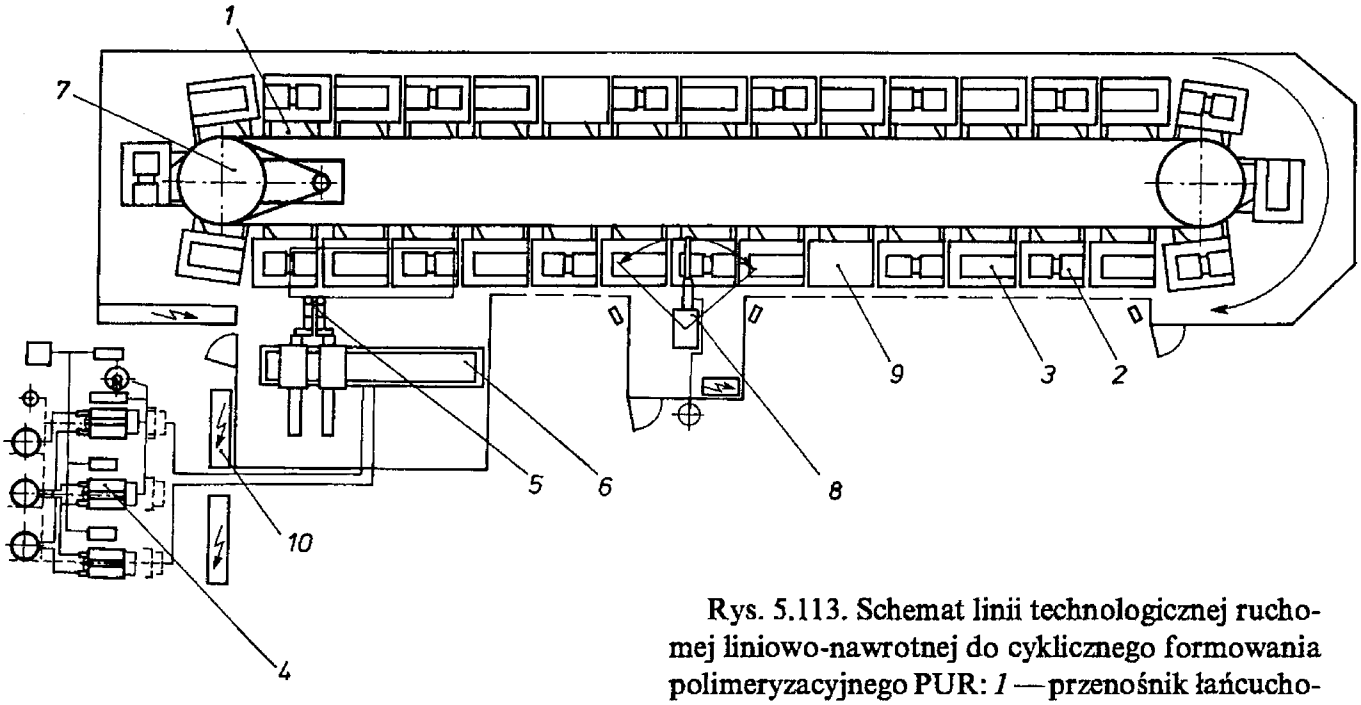
Na rysunku 5.112 przedstawiono przykładowo linię technologiczną ruchomą, karuzelową do cyklicznego formowania polimeryzacyjnego PUR techniką RIM, przeznaczoną do wytwarzania piankowych siedzeń samochodowych o różnych rozmiarach i regulowanej twardości, produkcji firmy Krauss–Maffei (Niemcy). Na przenośniku karuzelowym (*1*), wykonującym ruch podstawowy obrotowy znajduje się 16 form (*2*) mocowanych na przenośnikach liniowo-obrotowych (*3*), wykonujących ruchy pomocnicze, które kolejno w miarę obrotu przenośnika karuzelowego i ruchów przenośnika liniowo-obrotowego są podłączane do układu dwóch stacjonarnych głowic mieszających (*4*), działających jednocześnie lub przemiennie. Cykl procesu technologicznego obejmuje obrót przenośnika karuzelowego o kąt ($\pi/8$) rad, ruchy



Rys. 5.112. Schemat linii technologicznej ruchomej, karuzelowej do cyklicznego formowania polimeryzacyjnego PUR: *1* — przenośnik karuzelowy, *2* — formy, *3* — przenośniki liniowo-obrotowe, *4* — głowica mieszająca, *5* — napęd przenośnika karuzelowego, *6* — zespoły dozowania

formy na przenośniku liniowo-obrotowym, podłączenie głowic do formy i wreszcie wypełnienie gniazda. Cykl ten trwa 30 s. Linia jest zautomatyzowana, z dwoma robotami do głowic, sterowana komputerowo. Wspomnianą regulację twardości pianki uzyskuje się przez zmianę ilości wprowadzanego poroforu.

Przenośniki karuzelowe stosuje się wówczas, gdy ich średnica zewnętrzna nie przekracza 16 m, okazało się bowiem, że przy większych średnicach stają się one nieekonomiczne. W przypadku takiego doboru składu mieszaniny reaktywnej, że czas procesu polimeryzacji addycyjnej jest dłuższy, i jednocześnie przy konieczności zachowania odpowiednio dużej wydajności linii technologicznej formowania, zaleca się przenośniki liniowo-nawrotne (owalne). Na rysunku 5.113 pokazano linię technologiczną z takim właśnie przenośnikiem, przeznaczoną również do wytwarzania piankowych siedzeń samochodowych techniką RIM, produkcji firmy Krauss – Maffei (Niemcy). Wymagania stawiane siedzeniom oraz sposób ich spełniania są takie jak poprzednio. Na przenośniku łańcuchowym (*1*), wykonującym ruch podstawowy liniowo-nawrotny znajduje się do 30 form (*2*) mocowanych na przenośnikach obrotowych (*3*), wykonujących ruchy pomocnicze. Układ zasilania linii w mieszaninę



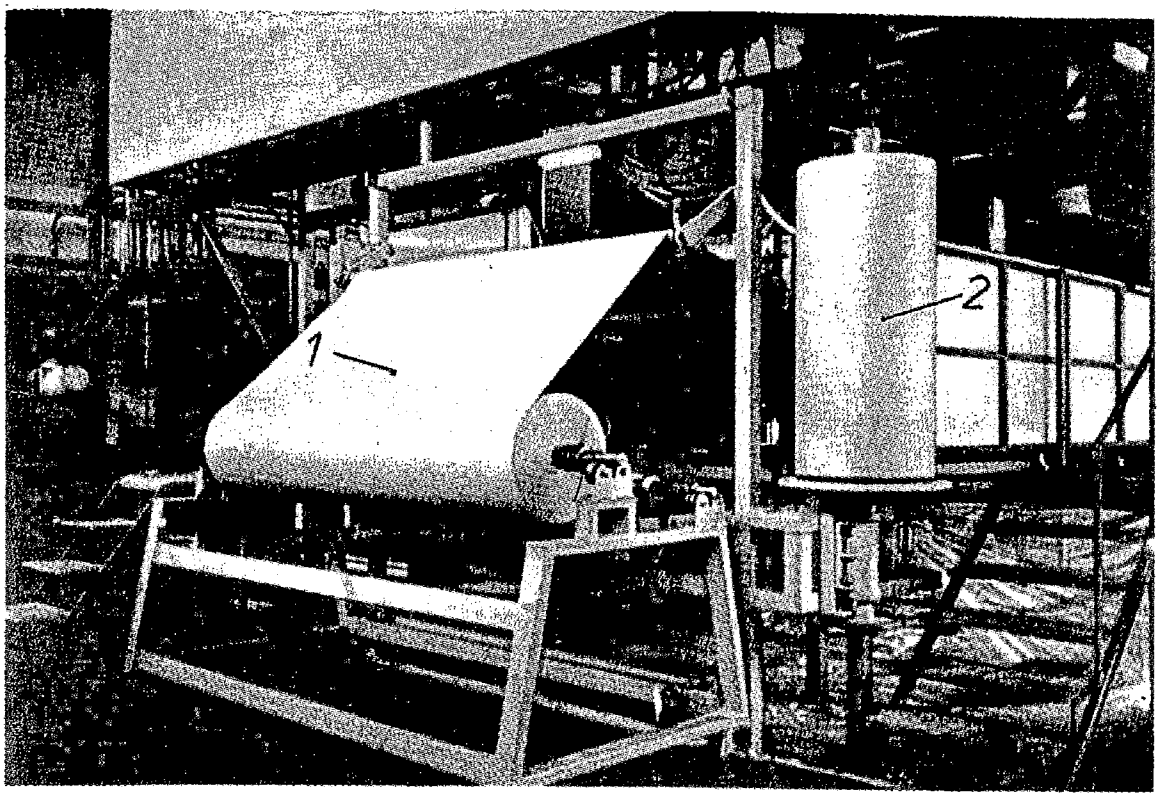
Rys. 5.113. Schemat linii technologicznej ruchomej liniowo-nawrotnej do cyklicznego formowania polimeryzacyjnego PUR: *1* — przenośnik łańcuchowy, *2* — formy, *3* — przenośnik obrotowy, *4* — zespoły zbiorników i pomp, *5* — głowice, *6* — robot do głowic, *7* — napęd przenośnika łańcuchowego, *8* — robot do pistoletu natryskującego środek przeciwprzyczepny, *9* — wózek zasilania nośników form, *10* — układy sterowania

reaktywną tworzą trzy zespoły (*4*) zbiorników i pomp oraz dwie głowice (*5*), jak również robot (*6*) o 9 stopniach swobody do manipulowania głowicami. Cykl procesu technologicznego trwa 7,5 s i obejmuje przesunięcie przenośnika łańcuchowego o odcinek drogi od formy do formy, ruchy formy na przenośniku obrotowym, podłączenie głowic do formy oraz wypełnienie gniazda. Linia jest zautomatyzowana i sterowana komputerowo.

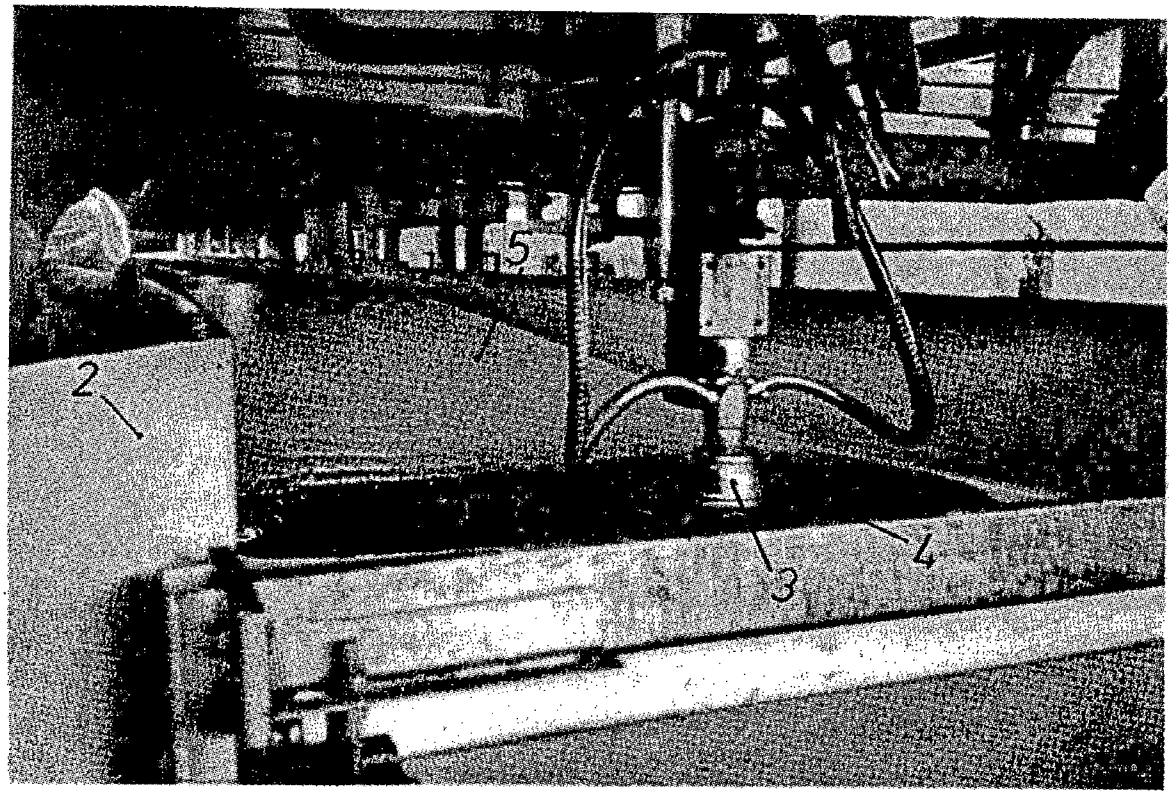
Linie technologiczne do pracy ciągłej obejmują głównie przesuwający się przenośnik taśmowy i głowicę mieszającą wykonującą ruch wahadłowy prostopadle do ruchu przenośnika, z której wylewa się mieszanina reaktywna na przenośnik. Skład mieszaniny dobiera się tak, że jej spienianie następuje dopiero w odległości $300 \div 600$ mm od głowicy, czyli od miejsca wylania (rys. 5.114). Aby mieszanina nie przywierała adhezyjnie do przenośnika, pokrywa się go taśmą folii lub papieru rozdzielającego, natomiast aby nie wylewała się z przenośnika, na jego boki wprowadza się taśmy folii lub papieru. Po dostatecznym dojrzeniu pianki wszystkie taśmy zwija się i ponownie używa. Otrzymane bloki lub arkusze są przecinane na elementy mniejsze według zastosowań. W niektórych rozwiązaniach stosuje się również folię lub papier od strony przeciwległej w stosunku do przenośnika i wtedy spienianie zachodzi jakby w zamkniętej formie — korycie. Pianki otrzymane w ten sposób odznaczają się bardziej równomiernymi komórkami.

Jako ciągły proces technologiczny traktuje się również natryskiwanie PUR, podobne w swej istocie do natryskiwania powłok malarskich. Na przykład amrykańska firma Graco produkuje urządzenia przewoźne, za pomocą których można nakładać powłoki antykorozyjne i izolacji cieplnej na dużych konstrukcjach stalowych, betonowych, cysternach kolejowych i samochodowych, silosach itp.

a)



b)

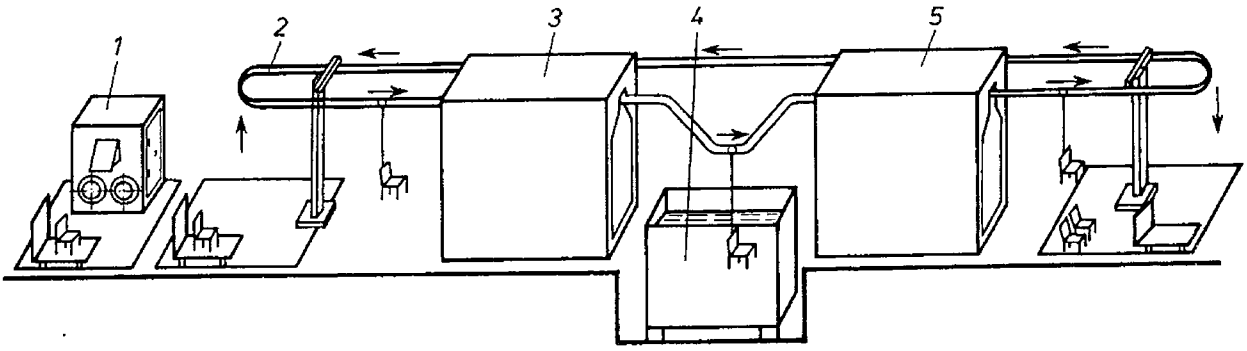


Rys. 5.114. Linia technologiczna ciągłego formowania polimeryzacyjnego PUR: a) fragment początkowy linii, b) fragment ilustrujący wylewanie mieszaniny reaktywnej; *1* — folia rozdzielająca odwijana na przenośnik, *2* — folia rozdzielająca odwijana na boki formowanego bloku, *3* — głowica, *4* — wylana mieszanina reaktywna, *5* — spieniająca się mieszanina (Impianti — Włochy)

5.6.4. Proces technologiczny nanoszenia

Duże znaczenie mają procesy technologiczne nanoszenia fluidyzacyjnego, polewającego i zanurzeniowego tworzyw (rozdz. 4, p. 4.2). Procesy te zachodzą zazwyczaj w liniach technologicznych.

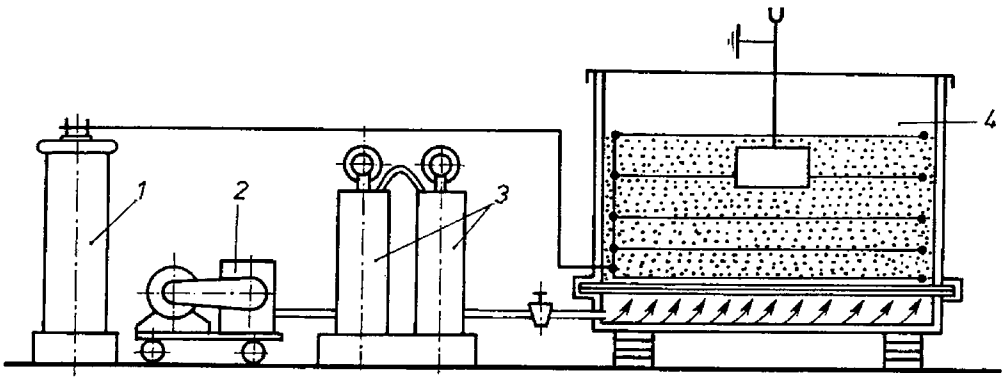
Na rysunku 5.115 przedstawiono schemat linii technologicznej do ciągłego nanoszenia fluidyzacyjnego tworzyw na przedmioty o średnich rozmiarach, np. na meble metalowe. Linia składa się głównie z: urządzenia (*1*) do obróbki strumienio-



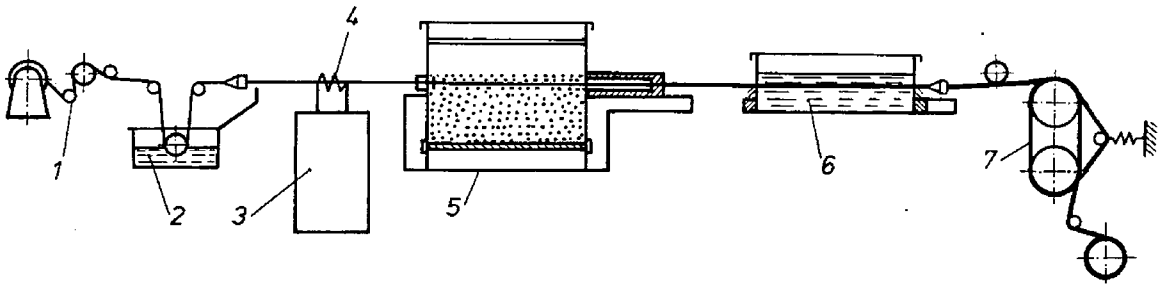
Rys. 5.115. Schemat linii technologicznej ciągłego nanoszenia fluidyzacyjnego tworzyw na meble stalowe; oznaczenia w tekście

wo-ściernej, poziomego przenośnika łańcuchowego podwieszonego (*2*), z obniżeniem nad fluidyzatorem, poruszającego się ruchem jednostajnym w obiegu zamkniętym, tunelu (*3*) nagrzewającego meble przed nanoszeniem, fluidyzatora (*4*) i komory (*5*) do powtórnego nagrzewania w celu ostatecznego stapiania tworzywa powłokowego. W liniach do nanoszenia cyklicznego sam proces nanoszenia odbywa się w ten sposób, że gdy przedmiot znajduje się nad fluidyzatorem, przenośnik poziomy zatrzymuje się na określony czas, a fluidyzator podnosi się, pozostając w tej pozycji w czasie zatrzymania przenośnika i następnie opuszcza do położenia pierwotnego. Można również komorę grzejną usytuować nad fluidyzatorem i po nagrzaniu przedmiotu, ruchem pionowym wprowadzić go do złoża i po ustalonym czasie wyjąć z niego [5.53]. Gaz do fluidyzacji doprowadza się ze sprężarki, dmuchawy, butli lub z sieci sprężonego powietrza. Zużycie gazu wynosi przeciętnie $0{,}35 \div 0{,}45$ m^3/h licząc na 1 dm^2 powierzchni dna fluidyzatora. W przypadku korzystania z gazu ze sprężarki lub z sieci sprężonego powietrza zaleca się używać filtrów do usuwania głównie skroplonej pary wodnej (rys. 5.116), co ma duże znaczenie podczas stosowania tworzyw o dużej higroskopijności, np. PA.

W ciągłym procesie technologicznym nanoszenia fluidyzacyjnego mogą być również wytwarzane powłoki na drutach, rurach i taśmach metalowych. Na rysunku 5.117 jest pokazany schemat linii technologicznej do ciągłego nanoszenia fluidyzacyjnego tworzywa na drut. Zwykle nanosi się tworzywo jednocześnie na kilka drutów, a grubość powłoki z PA 11 (Rilsan) wynosi około 100 μm. Procesy technologiczne nanoszenia fluidyzacyjnego tworzyw na taśmy i rury są znane od dawna; w swej istocie nie ulegały zasadniczym zmianom i zostały przedstawione w literaturze [5.13, 5.53, 5.54]. Nanoszenie to jest jednak wypierane przez często bardziej efektywne wytłaczanie



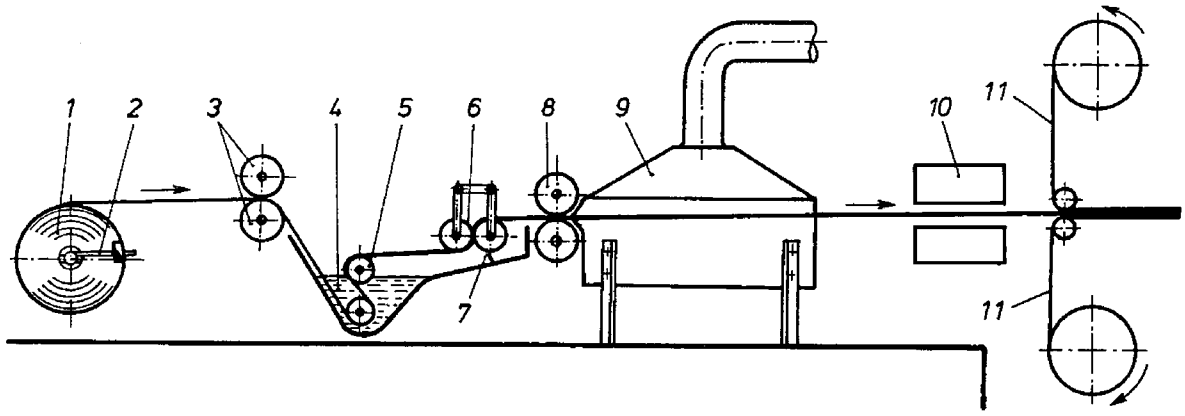
Rys. 5.116. Schemat układu zasilania fluidyzatora elektrostatycznego: *1* źródło wysokiego napięcia, *2* — sprężarka, *3* — filtr, *4* — fluidyzator elektrostatyczny



Rys. 5.117. Schemat linii technologicznej ciągłego nanoszenia fluidyzacyjnego tworzyw na drut: *1* — układ wałków odwijających i naciągających drut, *2* — wanna do odtłuszczania i fosforanowania drutu, *3* — generator wysokiej częstotliwości, *4* — wzbudnik, *5* — fluidyzator, *6* — urządzenie chłodzące, *7* — układ wałków odbierających i zwijających drut z powłoką

i współwytłaczanie powlekające, zwłaszcza w przypadkach powłok grubszych i wielowarstwowych.

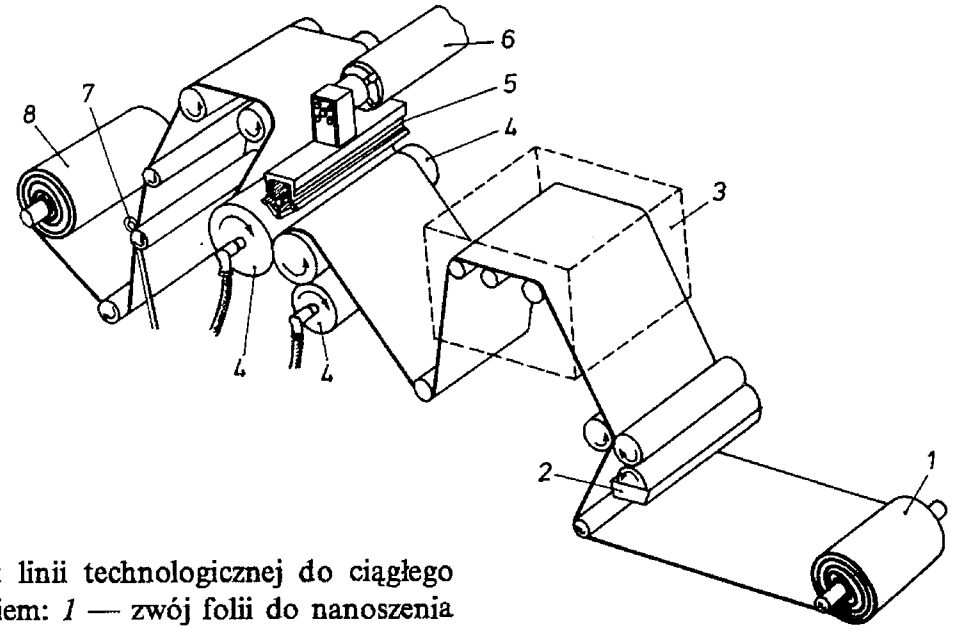
Na rysunku 5.118 pokazano schemat linii technologicznej do nanoszenia dwuwalcowego w celu otrzymania preimpregnatu z nośnika wstęgowego, obejmującej przeprowadzenie nośnika (tkaniny, maty, matotkaniny, łuszczki drewna) przez



Rys. 5.118. Schemat linii technologicznej ciągłego nanoszenia dwuwalcowego w celu otrzymania preimpregnatu: *1* — zwój nośnika, *2* — dźwignia hamująca odwijanie nośnika i powodująca jego naciąganie, *3* — walce prowadzące, *4* — wanna impregnacyjna, *5* — walce impregnujące żłobkowane, *6* — walce odciskające nadmiar roztworu tworzywa, *7* — listwa zgarniająca, *8* — walce transportujące, *9* — tunel grzejny, *10* — dmuchawy do ochładzania preimpregnatu, *11* — licowanie folią ochronną, np. folią PE

roztwór tworzywa, odparowanie rozpuszczalnika w podwyższonej temperaturze, ochłodzenie preimpregnatu i licowanie ochronną folią polimerową. W przypadku preimpregnatów poliestrowych z tkanin szklanych prędkość przemieszczania wstęgi wynosi na ogół 0,12÷0,15 m/min przy grubości preimpregnatu 0,5÷1 mm, a temperatura odparowywania rozpuszczalnika wynosi 70÷80°C. Folie zdziera się przed prasowaniem.

Proces technologiczny nanoszenia może być również łączony z innymi procesami technologicznymi, np. z wytłaczaniem powlekającym, tak jak to przedstawiono na rys. 5.119.



Rys. 5.119. Schemat linii technologicznej do ciągłego nanoszenia z wytłaczaniem: *1* — zwój folii do nanoszenia trójwalcowego z wytłaczaniem powlekającym, *2* — nanoszarka trójwalcowa, *3* — tunel grzejny, *4* — walce prowadzące o regulowanej temperaturze, *5* — głowica wytłaczarska szczelinowa, *6* — cylinder wytłaczarki, *7* — noże krążkowe do obcinania brzegów folii z powłoką dwuwarstwową, *8* — zwój folii z powłoką

5.7. Projektowanie procesów technologicznych

Aby procesy technologiczne otrzymywania wytworów lub przetworów z tworzywa przebiegały racjonalnie, zapewniając uzyskanie założonych efektów technicznych i ekonomicznych, konieczne jest odpowiednie ich projektowanie. Projektowanie to przeprowadzać można w biurze technologicznym przedsiębiorstwa, w którym przetwarza się tworzywa, bądź w jednostkach wyspecjalizowanych przedsiębiorstw, np. w ośrodkach badawczo-rozwojowych lub zakładach doświadczalnych.

Dane wejściowe do projektowania procesów technologicznych stanowią głównie informacje o wytworze lub przetworze dotyczące stawianych im wymagań użytkowych. Wymagania te są ustalane podczas *projektowania wytworu lub przetworu* i ujęte przede wszystkim w ich *dokumentacji konstrukcyjnej*. Skład dokumentacji konstrukcyjnej może być różny, w zależności od tego, co ona przedstawia i na jaką produkcję została opracowana.

Do najważniejszych elementów projektowania procesów technologicznych zalicza się *projektowanie toku technologicznego*, w tym zwłaszcza wybór metody i odmiany przetwórstwa, wybór linii i stanowisk technologicznych oraz opracowanie *dokumentacji technologicznej*, według której będzie przebiegać proces technologiczny. W przypadku wytworów jest to zazwyczaj poprzedzone analizą *technologiczności konstrukcji.*

Projektując tok technologiczny należy przede wszystkim uwzględniać:

— wydajność, którą należy maksymalizować,

— jakość, zwykle określaną kwantytatywnie, która jest zadana lub należy ją optymalizować,

— koszt jednostkowy, poddawany minimalizowaniu,

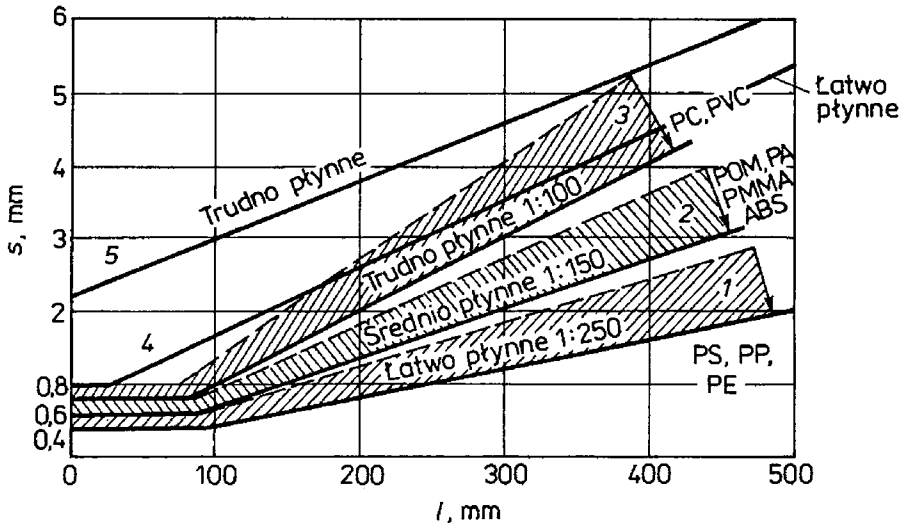
— jednostkowe zużycie energii, podlegające minimalizowaniu,

— koszty inwestycyjne oraz koszty eksploatacyjne linii i stanowisk technologicznych, poddawane minimalizowaniu,

— trwałość, niezawodność, funkcjonalność i ergonomiczność linii oraz stanowisk technologicznych, które są zadane lub należy je optymalizować.

5.7.1. Technologiczność konstrukcji wytworu

Pod pojęciem technologiczności konstrukcji wytworu rozumie się ogólnie takie jego rozwiązanie konstrukcyjne, które przy zachowaniu wymagań użytkowych zapewnia jednocześnie określone wymagania dotyczące przetwórstwa, a więc przede wszystkim niski koszt jednostkowy (bliżej o koszcie jednostkowym w następnym punkcie). Projektując proces technologiczny na ogół rozpoczyna się od analizy technologiczności konstrukcji wytworu. Dokumentacja konstrukcyjna wytworu jest sporządzana w biurze konstrukcyjnym przedsiębiorstwa, w którym przeprowadza się przetwórstwo, lub w jednostkach wyspecjalizowanych przedsiębiorstw, zatem gdzie indziej niż projektowanie procesu technologicznego, co powoduje, że analiza taka może niekiedy wnosić istotne korekty do dokumentacji konstrukcyjnej wytworu.



Rys. 5.120. Orientacyjna zależność grubości *s* ścianek wyprasek od długości *l* drogi przepływu tworzywa w formie (*1*), (*2*), (*3*) lub wysokości *l* wypraski (*4*), (*5*)

W praktyce inżynierskiej analizę technologiczności konstrukcji wytworu przeprowadza się na podstawie różnych wieloletnich doświadczeń, których rezultaty są opracowane w postaci szkiców konstrukcyjnych zalecanych rozwiązań, wykresów lub w postaci danych tabelarycznych. Literatura na ten temat jest dość obszerna, ale dotyczy głównie technologiczności konstrukcji wyprasek wtryskowych [5.71, 5.89, 5.116, 5.124, 5.139, 5.140] i z tego powodu w dalszej części tego punktu zostaną podane zwięźle tylko ważniejsze elementy dotyczące tych wyprasek.

Technologiczność konstrukcji wyprasek obejmuje następujące zagadnienia: grubość i kształt ścianek, wzmocnienia ścianek, otworów i obrzeży, pochylenia i zaokrąglenia ścianek, kształt i rozmieszczenie otworów, podcięcia, występy i otwory boczne, zaczepy, gwinty, powierzchnie robocze, linie łączenia strumieni tworzywa, napisy i znaki, płaszczyzny podziału, zapraski metalowe.

Grubość ścianek wyprasek, ogólnie ujmując, mieści się w granicach $0{,}3 \div 25$ mm, najczęściej $0{,}8 \div 6$ mm. Zależy ona od długości drogi przepływu tworzywa w formie i wysokości wypraski, rosnąc z powiększaniem się obu wielkości (rys. 5.120). Grubość ścianki może być zmniejszona, gdy stosuje się wiele punktów wtryskiwania. Aby ograniczyć anomalie wyprasek w postaci zapadnięć powierzchni i wklęśnięć oraz zmniejszyć naprężenia własne, powodowane przede wszystkim nierównomiernym skurczem cieplnym, obowiązuje zasada zachowania możliwie jednakowej grubości ścianek (rys. 5.121). *Sztywność wyprasek* uzyskuje się w małym stopniu wskutek wzrostu grubości ścianek, a w dużym — poprzez nadawanie im odpowiedniego kształtu, głównie niepłaskości i użebrowania (rys. 5.122 i 5.123). Zazwyczaj zadowalające usztywnienie powodują żebra wysokie, np. o wysokości równej pięciokrotnej grubości, lecz ich grubość nie może przekraczać 1,3 grubości ścianki, do której przylegają (tabl. 5.22).

W celu otwarcia formy, lub ułatwienia otwarcia, i wypchnięcia wypraski z gniazda jest konieczne pochylenie ścianek bocznych wypraski, czyli ścianek równoległych do kierunku otwierania. *Pochylenie ścianek wypraski* zależy od wielu czynników, przede wszystkim od wysokości ścianek (tabl. 5.23), kształtu wypraski, grubości ścianek, sztywności wypraski i od możliwości zastosowania odpowiedniego sposobu wypychania wypraski. Pochylenie zależy również od gładkości powierzchni, np. w określonych warunkach przy $R_a = 0{,}8$ μm najmniejszy kąt pochylenia wynosi 2°, a w tych samych warunkach przy $R_a = 2{,}5$ μm kąt wynosi 5°.

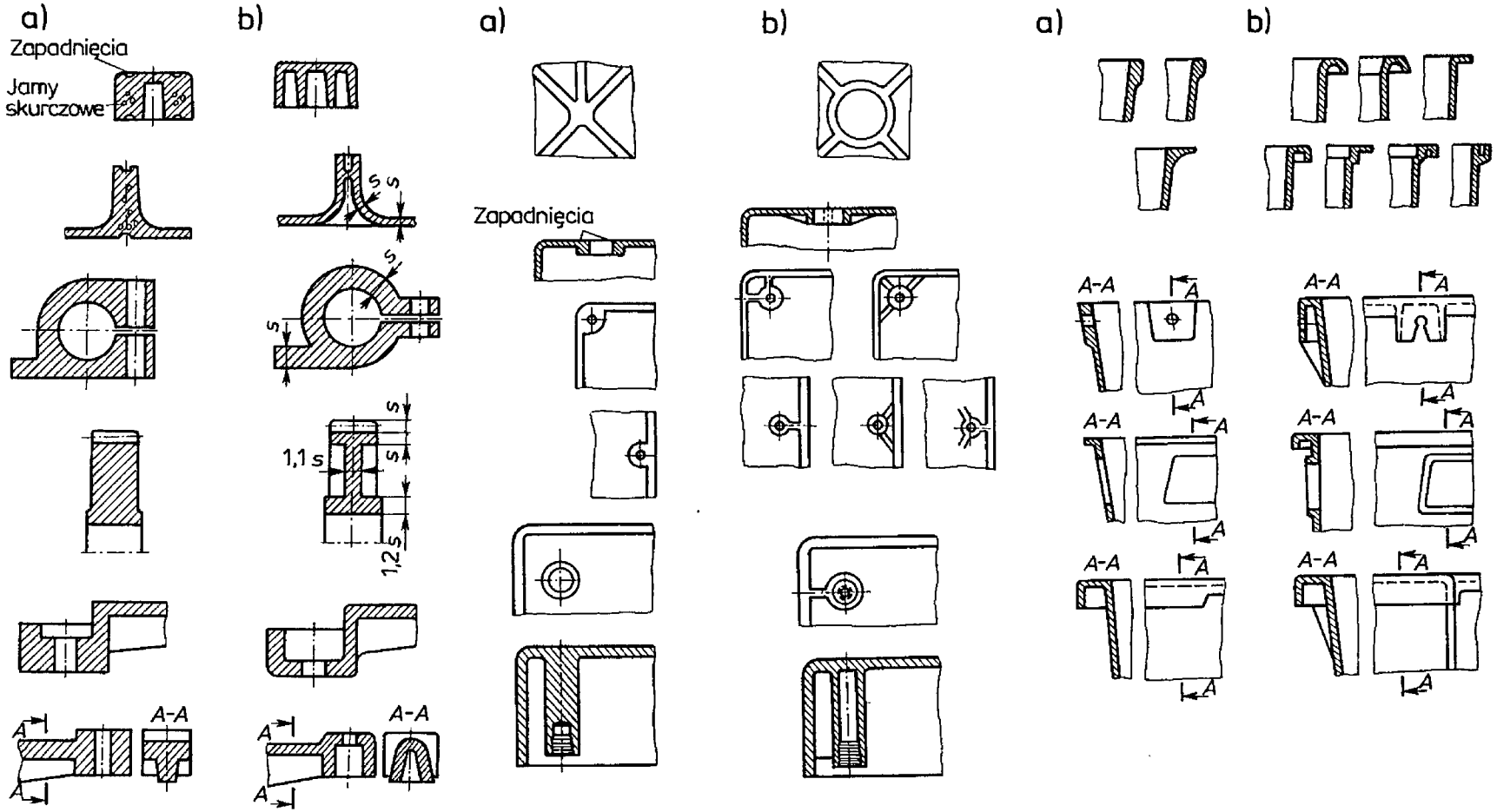
Otwory nieprzelotowe i przelotowe nie powinny w zasadzie mieć średnicy lub szerokości mniejszej niż 1 mm. Zbyt długie rdzenie mogą się uginać pod wpływem nacisku pochodzącego od przepływającego tworzywa. W związku z tym przyjmuje się dla otworów nieprzelotowych

$$l \leqslant 4D \tag{5.41}$$

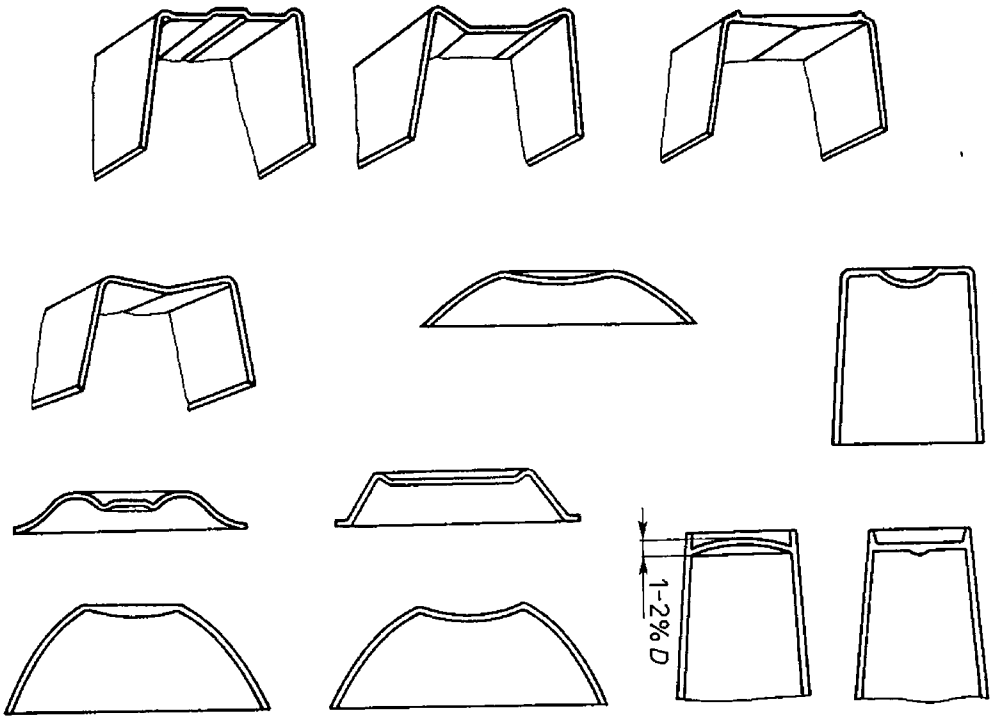
a dla otworów przelotowych i rdzeni podpartych obustronnie

$$l \leqslant 15D \tag{5.42}$$

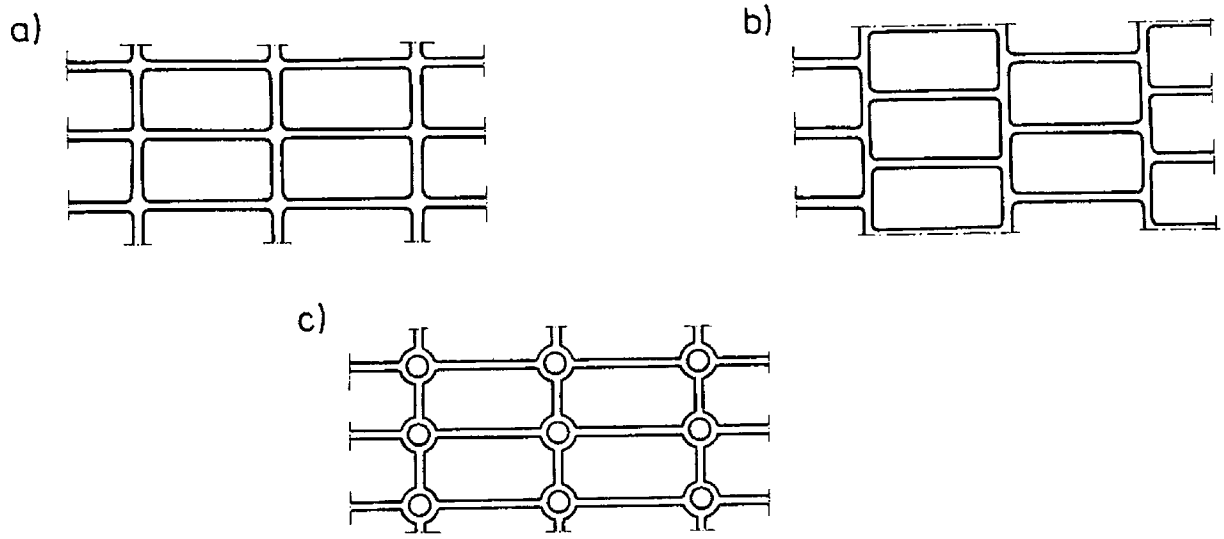
w pierwszym przypadku stosując wlew centralny, w drugim — pierścieniowy. Gdy wlew jest boczny, wówczas proporcje są znacznie mniejsze. Podcięcia, występy i otwory boczne powodują konieczność stosowania bardziej złożonych form z ruchomymi segmentami bądź wkładkami wyjmowanymi, zatem należy ich unikać. Wymie-



Rys. 5.121. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych wyprasek z zachowaniem zasady możliwie równomiernej grubości ścianek: a) rozwiązanie technologiczne, b) rozwiązanie nietechnologiczne



Rys. 5.122. Przykłady technologiczności konstrukcji dna naczyń i pojemników



Rys. 5.123. Użebrowanie dna w skrzynkach transportowych: a) krata sztywna, ale nietechnologiczna, b) krata technologiczna, ale mniej sztywna, c) krata sztywna i technologiczna

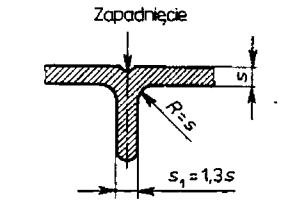
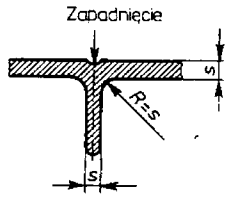
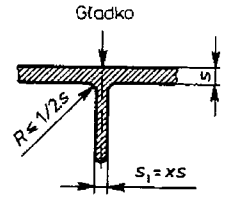
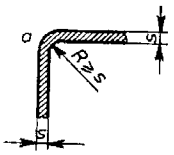
nione elementy często wydłużają czas cyklu wtryskiwania. Gdy jednak jest nieuniknione zastosowanie segmentów w celu uformowania otworów bocznych, należy usytuować je w określonej odległości od krawędzi wypraski, gdyż w przeciwnym przypadku komplikuje się konstrukcja formy. Podstawowe zasady ukształtowania podcięć, występów i otworów bocznych przedstawiono w tabl. 5.24.

W wypraskach stosuje się gwinty trójkątne (metryczne zwykłe, grubo- i drobnozwojne oraz calowe), okrągłe, zaokrąglone, trapezowe symetryczne i niesymetryczne (PN-81/M-02116 i PN-72/0-79082). Wejścia gwintów do tworzywa powinny być, w przeciwieństwie do gwintów metalowych, podsadzone w celu wzmocnienia pierwszego zwoju, wyjścia zaś nie mogą być podcięte, gdyż utrudnia to lub wręcz uniemożliwia wykręcanie wypraski. Gwint wypraski nie może przechodzić przez

miejsca zgrubione, gdyż w miejscach tych zachodzi jego odkształcenie spowodowane nadmiernym skurczem, a gwint w nakrętkach nie może dochodzić do dna, gdyż powoduje to koncentrację naprężeń i pęknięcia (tabl. 5.25).

Tablica 5.22

Ukształtowanie żeber i naroży wyprasek

a) 	a) konstrukcje podlegające dużym obciążeniom mechanicznym
b) 	b) kształt zalecany (nie występują wypaczenia)
c) 	c) wypraska bez zapadnięć dla PE $x = 0{,}5 \div 0{,}7$ PP, PA $x = 0{,}3 \div 0{,}6$ POM $x = 0{,}6 \div 0{,}7$ PET $x = 0{,}6 \div 0{,}9$ PS, ABS, SAN $x = 0{,}5 \div 0{,}8$ CAB, PC $x = 0{,}4 \div 0{,}7$
d) 	d) naroże wypraski obciążonej mechanicznie

Powierzchnie wypraski stanowią odwzorowanie, głównie o charakterze geometryczno-kinematycznym, powierzchni gniazda formującego, co ma szczególne znaczenie w odniesieniu do powierzchni roboczych, do których stosuje się miary odwzorowania chropowatości powierzchni. Linie łączenia strumieni tworzywa, tworzące po zestaleniu lub utwardzeniu szew, są nieuniknione, ale szczególnie występują w przypadku kilku punktów wtryskiwania, opływania przez tworzywo rdzenia lub stempla formującego otwór, zróżnicowanych dróg i prędkości przepływu w poszczególnych obszarach gniazda formy oraz w wypraskach złożonych geometrycznie (rys. 5.124). Na ogół są one zaliczane do anomalii powierzchniowych, ograniczanych różnymi sposobami (rys. 5.125) i maskowane, rzadziej usuwane odpowiednim

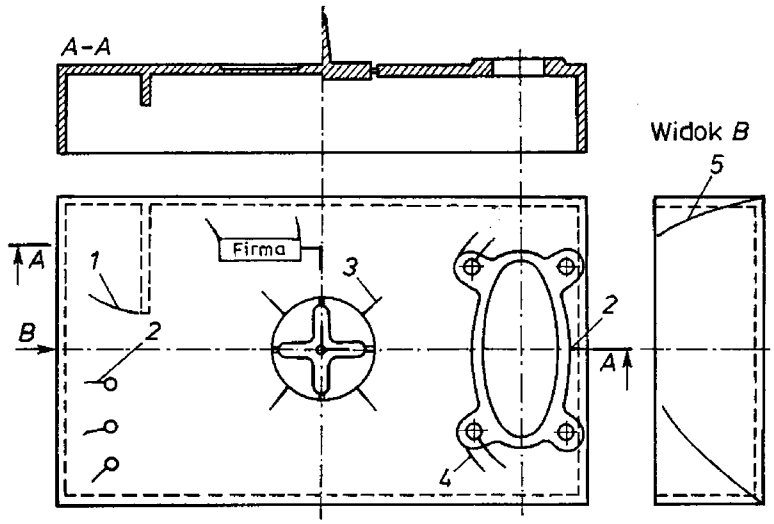
fakturowaniem powierzchni bądź ewentualnie malowaniem. Trzeba zaznaczyć, że metalizowanie, zwłaszcza cienką warstwą metali, często nie tylko nie maskuje szwu, ale jeszcze bardziej go uwidacznia.

Tablica 5.23

Zależności pomiędzy elementami geometrycznymi pochylenia ścianek wyprasek

Kąt pochylenia α		0°10′	0°30′	1°	1°30′	2°	3°	5°	10°	12°	15°
Pochylenie x/h		0,003	0,009	0,0175	0,026	0,035	0,052	0,088	0,176	0,21	0,268
Wysokość wypraski h, mm	10	0,03	0,09	0,17	0,26	0,35	0,52	0,88	1,76	2,13	2,68
	30	0,09	0,26	0,51	0,78	1,05	1,56	2,64	5,28	6,39	8,04
	50	0,15	0,43	0,85	1,3	1,75	2,6	4,40	8,80	10,65	13,40
	70	0,21	0,61	1,2	1,82	2,45	3,64	6,16	12,32	14,91	18,76
	90	0,27	0,78	1,53	2,34	3,15	4,68	7,92	15,84	19,17	24,12
	150	0,45	1,3	2,5	3,9	5,2	7,8	13,2	26,4	31,9	40,2
	250	0,75	2,2	4,3	6,5	8,7	13,0	22,0	44,0	53,2	67,0
	350	—	3,1	6,0	9,1	12,2	18,2	30,8	61,6	74,5	93,8
	450	—	3,9	7,8	11,7	15,7	23,4	39,6	79,2	95,8	120,6
	500	—	—	8,7	13,0	17,5	26,0	44,0	88,0	106,5	134,0

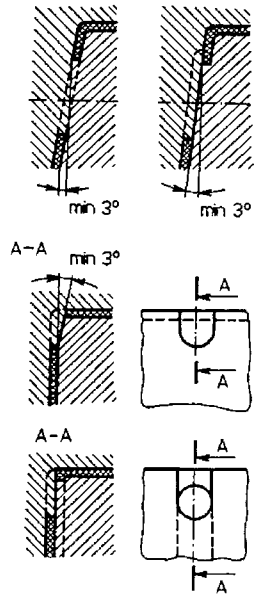
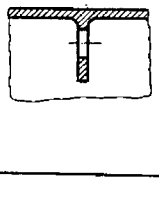
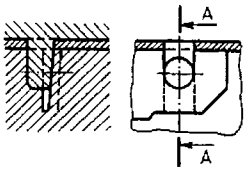
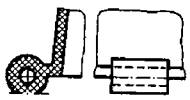
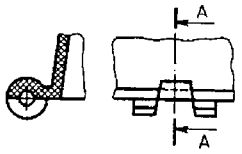
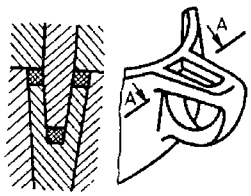
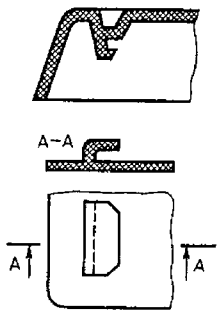
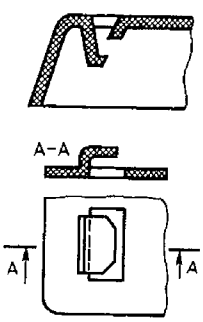
Uwaga: x oznacza szerokość podstawy pochylenia, $\text{tg}\,\alpha = x/h$.

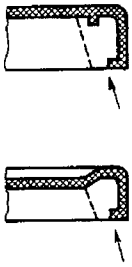
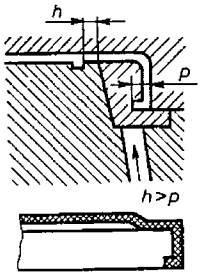
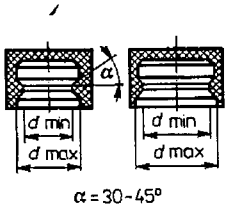
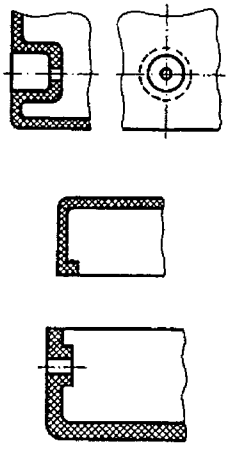
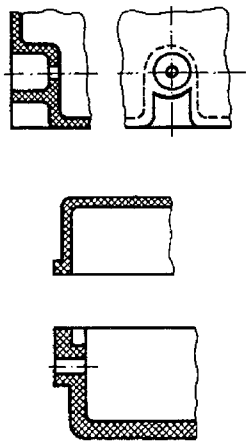
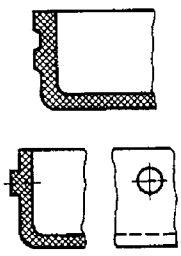
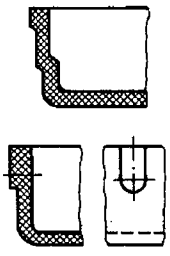


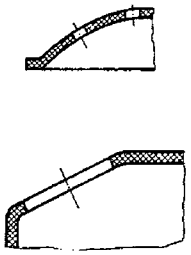
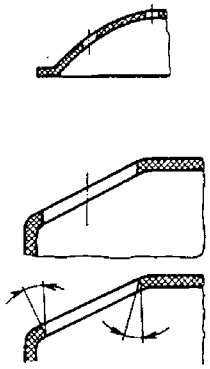
Rys. 5.124. Przyczyny powstawania szwów: *1* — rozdzielenie strumienia wpływającego do żebra, *2* — opływanie stempli formujących otwory, *3* — łączenie strumieni spowodowane wieloma (w tym przypadku czterema) punktami wtryskiwania, *4* — rozdzielenie strumienia spowodowane zmniejszeniem prędkości przy wypełnianiu zgrubienia, *5* — różnice długości dróg przepływu

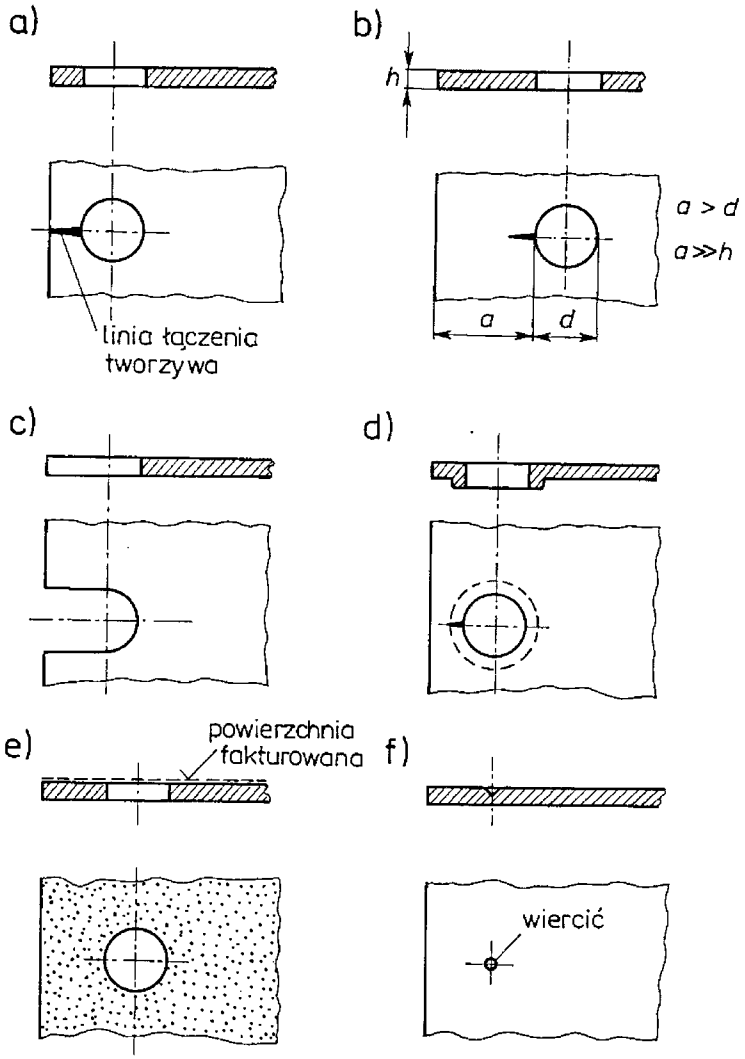
Napisy i znaki na wyprasce mogą być wykonane podczas procesu otrzymywania wypraski lub później w czasie drukowania. Grawerowanie powierzchni gniazda w głąb materiału jest prostsze technologicznie, ale powoduje na wyprasce wypukłe napisy i znaki, które łatwo ulegają uszkodzeniu lub mogą być niedopuszczalne przy użytkowaniu wypraski. Odwrotnie jest, gdy na wyprasce występują napisy i znaki wklęsłe. Można wreszcie stosować wypukłe napisy i znaki na wyprasce, umieszczone w lokalnym wgłębieniu wypraski. Głębokość napisów i znaków nie powinna

Ukształtowanie podcięć, występów i otworów bocznych

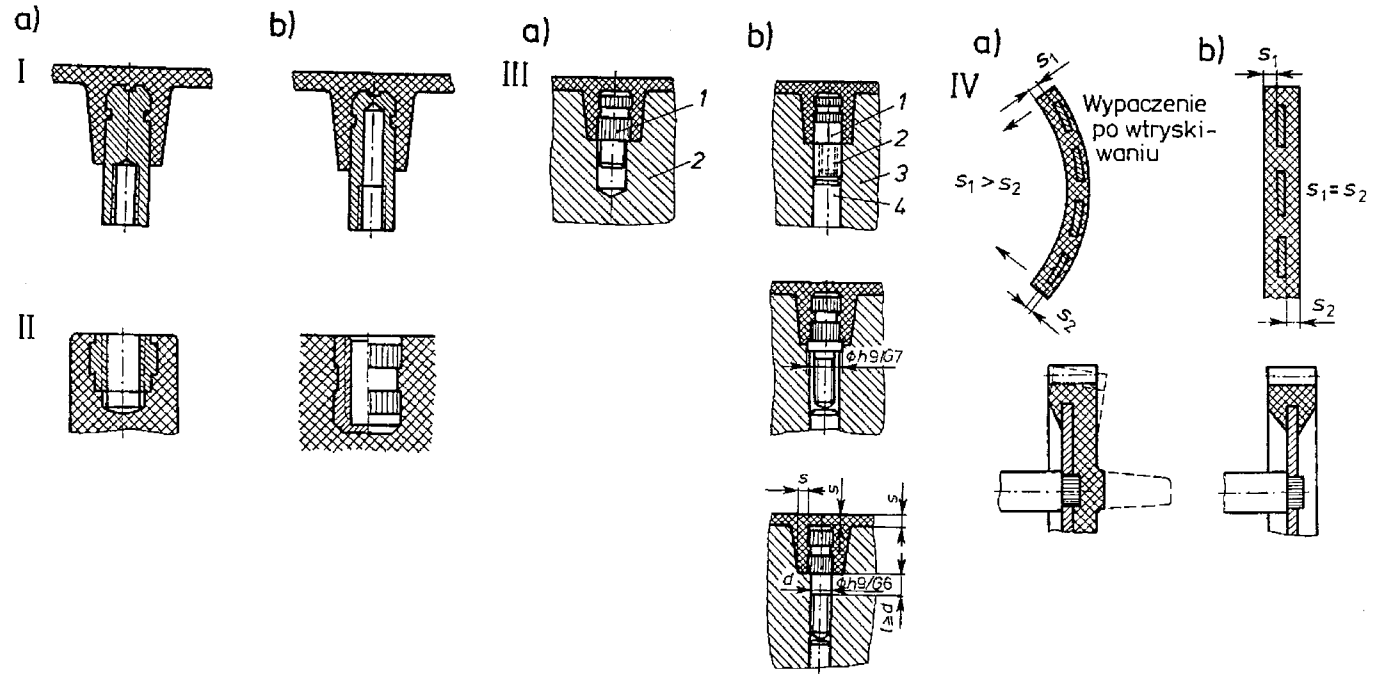
Konstrukcja nietechnologiczna	Konstrukcja technologiczna	Opis
		a) otwory w ściankach bocznych wykonywane metodą tzw. mijanych stempli
		b) otwory w przegrodach
		c) zawiasy
		d) ucha
		e) zaczepy

Konstrukcja nietechnologiczna	Konstrukcja technologiczna	Opis
		f) szczeliny maskujące
		g) podcięcia wewnętrzne — występ wypraski uniemożliwia przesunięcie szczęki
		h) podcięcia wewnętrzne zdzierane
		j) eliminowanie podcięć wewnętrznych
		k) eliminowanie podcięć zewnętrznych

Konstrukcja nietechnologiczna	Konstrukcja technologiczna	Opis
		1) kierunek otworów zgodny z kierunkiem otwierania formy — otwór formowany przez matrycę — otwór formowany przez stempel



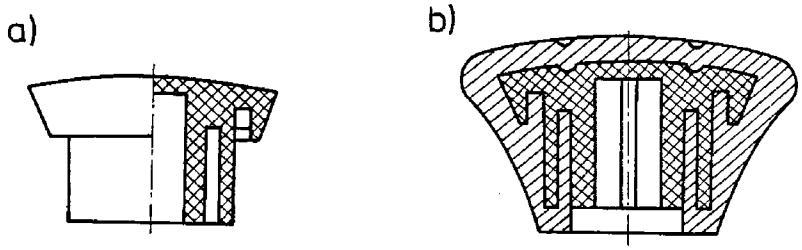
Rys. 5.125. Przykład możliwości rozwiązania położenia i wykonania otworu w pobliżu krawędzi wypraski ze względu na szew: a) rozwiązanie nieprawidłowe, b) odsunięcie otworu od krawędzi, c) zmiana kształtu otworu, d) wzmocnienie materiałowe, e) fakturowanie powierzchni, f) zaznaczenie punktu późniejszego wiercenia otworu



Rys. 5.126. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych wyprasek z zapraskami metalowymi: a) rozwiązanie technologiczne, b) rozwiązanie nietechnologiczne; I — zapraska o zbyt dużej masie powoduje późniejsze zestalanie tworzywa wokół niej, II — nieprzelotowy otwór z gwintem powoduje podlewy tworzywa, III — gwint zapraski nie może być bezpośrednio pasowany w otworze formy, lecz zabezpieczony przez wkręcaną tulejkę, kołnierz zapraski lub jej część walcową (*1* — zapraska, *2* — forma, *3* — wypychacz, *4* — tulejka), IV — różnice grubości warstw tworzywa po obu stronach zapraski powodują nierównomierność skurczu i odkształcenia wypraski

przekraczać 1/3 grubości ścianki, gdyż w przeciwnym przypadku powstają linie łączenia strumieni tworzywa, podobnie jak przy otworach.

W wypraskach osadza się również elementy z metali lub tworzyw, zwane *zapraskami*. Podstawową funkcją zaprasek metalowych jest wzmocnienie tego fragmentu wypraski, w którym zapraska się znajduje, wyrażające się zwiększeniem funkcjonalności, trwałości i niezawodności. Pospolitymi zapraskami metalowymi są tuleje kształtowe z przelotowymi i nieprzelotowymi otworami gwintowanymi, kształtowe trzpienie gwintowe oraz pręty i blaszki kształtowe. Zapraski są wykonane głównie ze stali, a tam, gdzie jest wymagana odporność na korozję, z mosiądzu lub stopów aluminium. W wypraskach z zapraskami metalowymi występują nieuchronnie naprężenia własne wynikające głównie z różnic w rozszerzalności cieplnej, która jest wielokrotnie większa w przypadku tworzyw niż metali. Na rysunku 5.126 przedstawiono przykłady

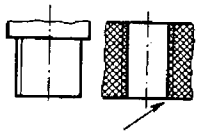
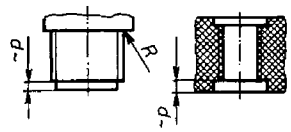
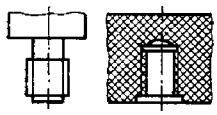
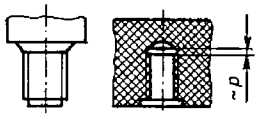
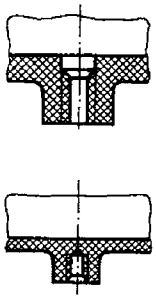
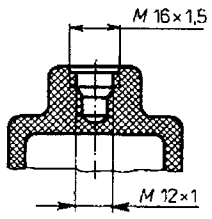
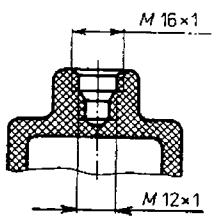
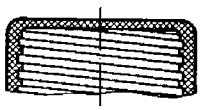
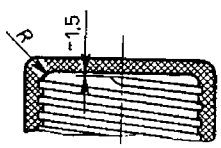


Rys. 5.127. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego gałki z zapraską tworzywową: a) wypraska z PA napełniona krótkim włóknem szklanym będąca zapraską, b) wypraska z PVC z zapraską tworzywową

rozwiązań konstrukcyjnych wyprasek z zapraskami metalowymi. Wypraski z zapraskami tworzywowymi stanowią zasadniczo rozwiązanie alternatywne w stosunku do wyprasek otrzymanych poprzez wtryskiwanie dwuskładnikowe (rozdz. 3, p. 3.2.6), z tym, że potrzebne są dwa różne procesy technologiczne (rys. 5.127). O wyborze rozwiąznia decydują głównie względy ekonomiczne i organizacyjne, ale trzeba brać pod uwagę, że adhezja obu składników wypraski przy wtryskiwaniu dwuskładnikowym jest większa.

Tablica 5.25

Ukształtowanie otworów gwintowych

Konstrukcja nieprawidłowa	Konstrukcja prawidłowa	Opis
		a) zakończenie gwintów wykręcanych z formy p — skok gwintu
		b) zakończenie gwintów wykręcanych z formy p — skok gwintu
		c) umieszczenie otworów gwintowych w nadlewach
		d) zgodność skoku gwintu w otworach współosiowych
		e) zakończenie gwintu w nakrętce

5.7.2. Podstawy wyboru metody i odmiany przetwórstwa

Wybrana metoda i odmiana przetwórstwa powinny spełniać wymagania użytkowe w odniesieniu do wytworów lub przetworów otrzymywanych za ich pomocą, a zwłaszcza zapewniać optymalną jakość i największą wydajność przy jak najmniejszych kosztach. Determinuje się również rodzaj (skalę) produkcji, która może być jednostkowa, seryjna lub masowa (tabl. 5.26), powiązania kooperacyjne i inne zagadnienia o charakterze organizacyjnym i handlowym. Wybór jest więc w istocie problemem optymalizacji, w zasadzie nie różniącym się od problemu optymalizacji warunków przetwórstwa. W praktyce wybór metody lub odmiany przetwórstwa przeprowadza się na podstawie istoty i możliwości technologicznych metod i odmian z uwzględnieniem kosztów. Duże znaczenie podczas omawianego wyboru ma wyposażenie w maszyny i narzędzia przetwórcze zakładu przetwarzającego, a pewne znaczenie mają również kwalifikacje i doświadczenia jego pracowników. Wybór metody i odmiany przetwórstwa przeprowadza się na ogół w dwu etapach: etapie wstępnym i ostatecznym.

Tablica 5.26

Związki pomiędzy czynnikami charakteryzującymi otrzymywanie wytworów i przetworów a rodzajem (skalą) produkcji

Czynniki charakteryzujące otrzymywanie wytworów lub przetworów	Rodzaj produkcji		
	jednostkowa	seryjna	masowa
Rodzaj wytworów i przetworów	różne bez prawidłowości ich zmiany	technologicznie podobne, okresowo zmienne	ściśle określone co do kształtu i wymiarów oraz właściwości
Rodzaj maszyn i urządzeń	uniwersalne	uniwersalne i specjalizowane	specjalizowane i specjalne
Stosowane oprzyrządowanie	uniwersalne raczej ubogie	uniwersalne i złożone, a nawet specjalne	specjalne często w wysokim stopniu zautomatyzowane
Projektowanie procesów technologicznych	szkicowe	dość rozbudowane i szczegółowe	rozbudowane i szczegółowe w ujęciu wariantowym
Kwalifikacje pracowników	bardzo wysokie	wysokie lub średnie	średnie lub niskie, niektórych bardzo wysokie
Koszt przygotowania produkcji	bardzo niski	wysoki	bardzo wysoki
Koszt jednostkowy	bardzo wysoki	niski	bardzo niski

Etap wstępny dotyczy zazwyczaj wyboru metody przetwórstwa. Wybór ten ułatwia podział wytworów według podobieństwa technologicznego. Podział może mieć charakter ogólny (tabl. 5.27) lub być bardziej szczegółowy [5.31]. Tego rodzaju podział umożliwia również typizację metod i odmian przetwórstwa. W rezultacie wyboru wstępnego otrzymuje się na ogół dwie lub trzy metody ewentualnie odmiany przetwórstwa.

Etap ostateczny opiera się na odpowiedniej *analizie techniczno-ekonomicznej metod lub odmian przetwórstwa* wybranych wstępnie w etapie I. Elementarną analizę stanowi rachunek na podstawie wskaźników techniczno-ekonomicznych. Jednym z najprostszych wskaźników jest *koszt jednostkowy*, czyli koszt wytworzenia jednostki wytworu lub przetworu. Znając koszt własny wytwarzania K_w określonej liczby X jednakowych wytworów lub przetworów, koszt jednostkowy K_j można określić zależnością

$$K_j = \frac{K_w}{X} \tag{5.43}$$

Tablica 5.27

Podział wytworów z tworzyw według podobieństwa technologicznego

Przedmiot typu	Charakterystyka kształtu i wymiarów przedmiotu	Typowa metoda przetwórstwa
A. „Bryła"	przestrzenny o złożonych kształtach — trzy wymiary są tego samego rzędu: na ogół od kilku do kilkuset mm	SPa, SG, PO, RC, UC, WT, PRa, OD, SPi, NA, KL, KI, ME, DR, UCh
B. „Skorupa"	przestrzenny o złożonych kształtach — dwa wymiary są tego samego rzędu	SPa, UC, PRa, LA, OD, NA, KL, KI
C. „Drobny"	przestrzenny o złożonych kształtach — trzy wymiary są tego samego rzędu: na ogół od ułamka do kilku mm	SU, UC, WT, KL
D. „Płyta"	płaski — dwa wymiary są znacznie większe od trzeciego	SPa, PO, WY, PRa, LA, OD, SPi, NA, KL, KI, ME, DR
E. „Folia"	dwa wymiary są bardzo znacznie większe od trzeciego	SG, RC, UC, WY, KA, OD, KL, ME, DR, UCh
F. „Pręt"	jeden wymiar jest znacznie większy od dwóch pozostałych	SPa, SG, UC, WY, LA, OD, NA, KL, UCh
G. „Włókno"	jeden wymiar jest bardzo znacznie większy od dwóch pozostałych	PRz, UCh

Oznaczenia: SPa — spawanie, SG — zgrzewanie, PO — porowanie, RC — rozdzielanie cieplne, SU — suszenie, UC — ulepszanie cieplne, WY — wytłaczanie, WT — wtryskiwanie, PRa — prasowanie, LA — laminowanie, KA — kalandrowanie, PRz — przędzenie, OD — odlewanie, SPi — spienianie, NA — nanoszenie, KL — klejenie, KI — kitowanie, ME — metalizowanie, DR — drukowanie, UCh — ulepszanie chemiczne.

Koszt jednostkowy wyraża się na ogół w następujących jednostkach podstawowych: w złotych na sztukę, złotych na kilogram, złotych na metr, złotych na metr sześcienny. Wybiera się tę metodę lub odmianę przetwórstwa, dla której przy takiej samej bądź podobnej jakości i wydajności koszt jednostkowy jest najmniejszy. Jeżeli brak jest danych co do jakości i wydajności, wskaźnik ten nie może być stosowany.

Koszt własny K_w obejmuje koszty bezpośrednie, czyli koszty tworzywa T, koszty nakładowe (ruchu) E, koszty robocizny bezpośredniej R i koszty przygotowania produkcji, różnych opłat itp., oznaczone łącznie S, oraz obejmuje koszty pośrednie, a więc koszty wydziałowe W i ogólnozakładowe Z. Przy założeniu, że koszty bezpośrednie są związane z daną metodą lub odmianą przetwórstwa i są proporcjonalne do liczby X jednakowych wytworów lub przetworów, natomiast koszty pośrednie również są związane z daną metodą lub odmianą przetwórstwa, ale nie z liczbą X, wzór na koszt własny przybiera postać

$$K_w = (T + E + R + S)X + W + Z \tag{5.44}$$

Uwzględniając tę zależność wzór (5.43) można napisać w postaci

$$K_j = T + E + R + S + \frac{W + Z}{X} \tag{5.45}$$

Innym prostym wskaźnikiem techniczno-ekonomicznym jest *wskaźnik efektywności techniczno-ekonomicznej* K_e definiowany jako iloraz kosztu jednostkowego K_j i czasu T_u użytkowania wytworu do momentu odnowy lub użytkowania przetworu do momentu utraty żądanych właściwości

$$K_e = \frac{K_j}{T_u} \tag{5.46}$$

Po uwzględnieniu zależności (5.43) wzór ten przybiera postać

$$K_e = \frac{K_w}{XT_u} \tag{5.47}$$

a podstawiając wzór (5.45)

$$K_e = \frac{T + E + R + S + \dfrac{W + Z}{X}}{T_u} \tag{5.48}$$

Wskaźnik K_e wyraża się w jednostkach podstawowych: w złotych na sztukę i godzinę, złotych na kilogram i godzinę, złotych na metr i godzinę, lub złotych na metr sześcienny i godzinę. Wybiera się tę metodę lub odmianę przetwórstwa, dla której przy takiej samej bądź podobnej wydajności, wskaźnik efektywności techniczno-ekonomicznej jest najmniejszy.

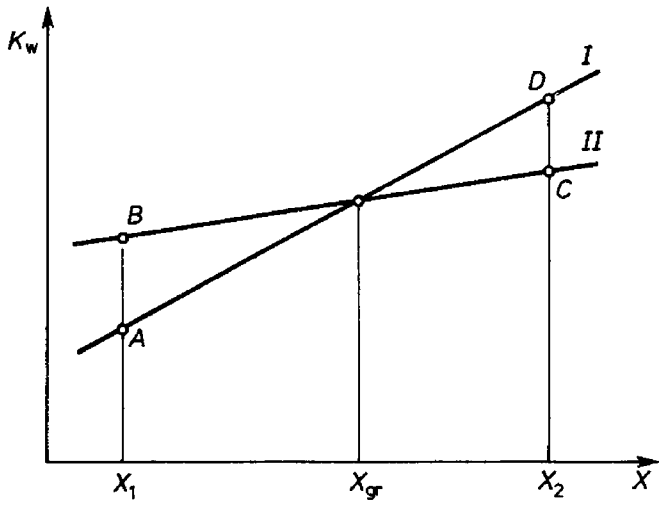
Oznaczając $T + E + R + S = a$ oraz $W + Z = b$, wzór (5.44) można napisać w postaci

$$K_w = aX + b \tag{5.49}$$

a wzór na koszt jednostkowy

$$K_j = a + \frac{b}{X} \tag{5.50}$$

Jeżeli na przykład dla jednej metody lub odmiany przetwórstwa wykres zależności (5.49) ma postać prostej *I* (rys. 5.128), a dla drugiej postać prostej *II*, to istnieje taka liczba graniczna X_{gr} jednakowych wytworów lub przetworów, przy której koszty własne są sobie równe. Dla $X_1 < X_{gr}$ korzystniejszy jest wariant *I*, a oszczędność kosztu, jaką się uzyskuje stosując ten wariant zamiast wariantu *II*, odpowiada odcinkowi *AB*, natomiast dla $X_2 > X_{gr}$ korzystniejszy jest wariant *II*, dając oszczędność odpowiadającą odcinkowi *CD*.

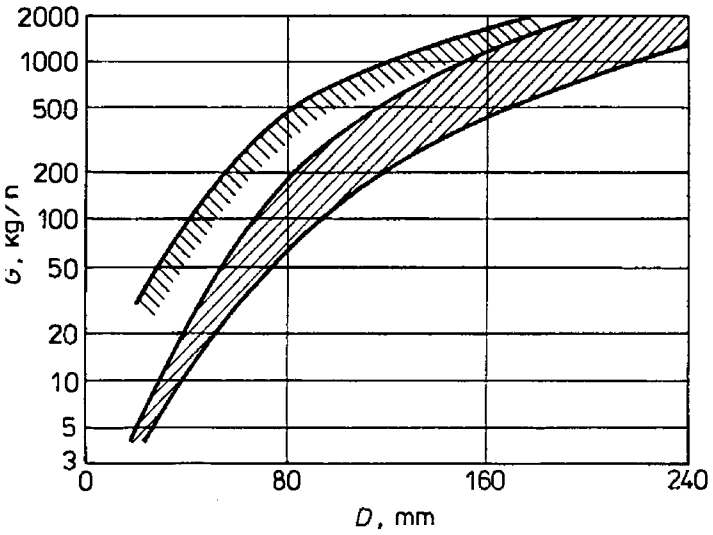


Rys. 5.128. Zależność kosztu własnego K_w wytworu lub przetworu od ich ilości *X* przy dwóch wariantach *I* oraz *II* metody lub odmiany przetwórstwa

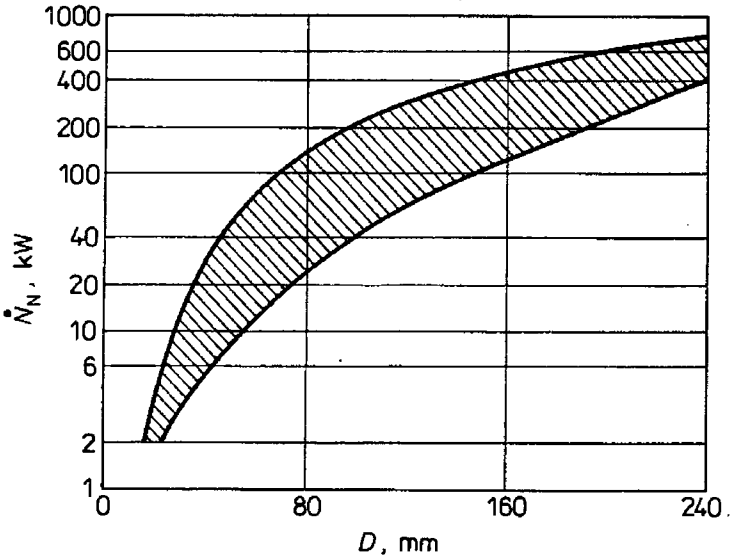
5.7.3. Podstawy wyboru linii i stanowiska

Po dokonaniu wyboru optymalnej metody lub odmiany przetwórstwa przeprowadza się projektowanie przebiegu całego procesu technologicznego, a następnie dobiera się maszyny i narzędzia przetwórcze oraz urządzenia do przeprowadzania procesów uzupełniających — przygotowawczych i zakończeniowych — jak również oprzyrządowanie technologiczne. Doboru tego dokonuje się na podstawie analiz, obliczeń, wykresów, tabel oraz danych technicznych i eksploatacyjnych od producentów maszyn, narzędzi, urządzeń uzupełniających, jak również oprzyrządowania technologicznego.

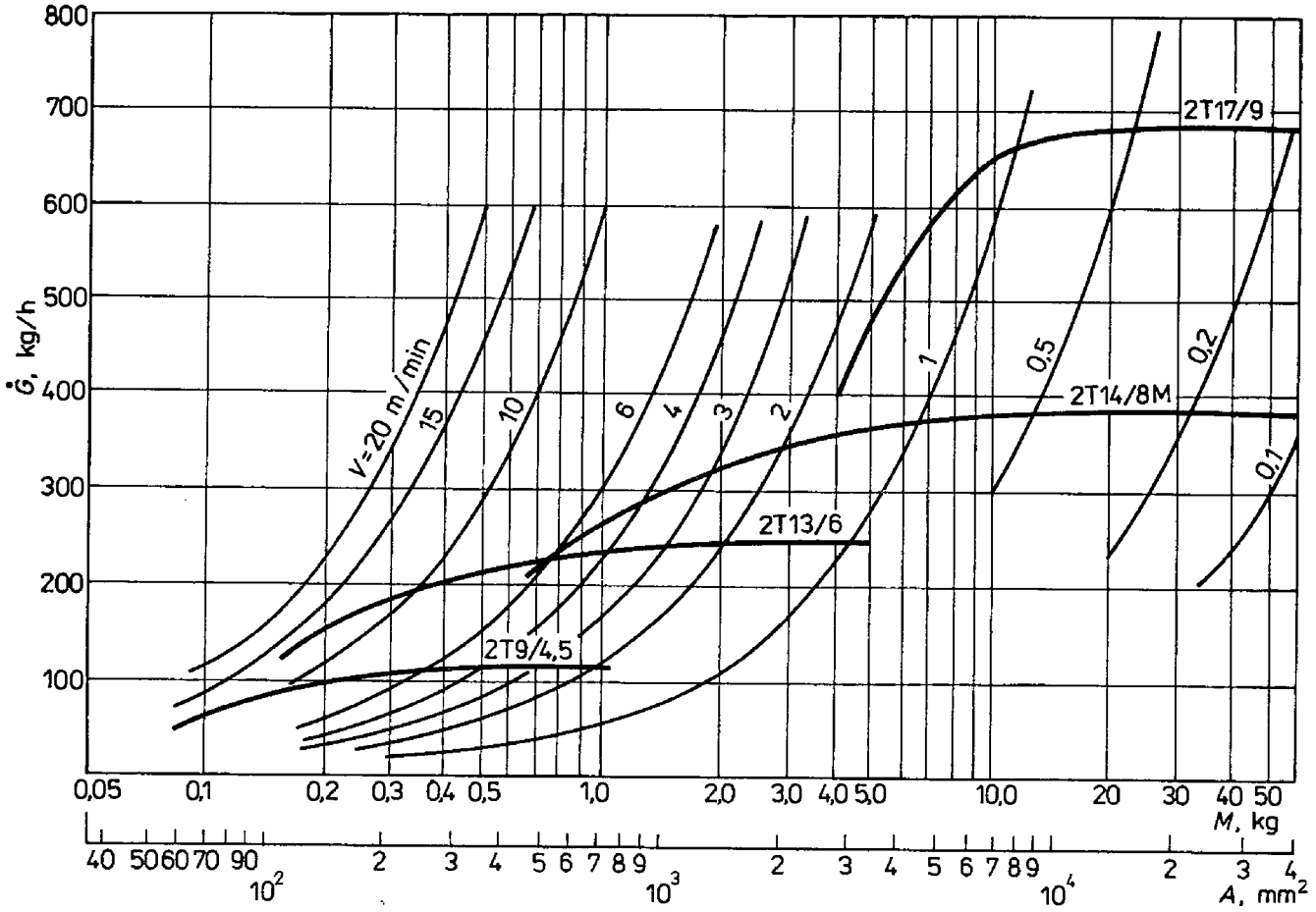
Na przykład w przypadku wytłaczania jednoślimakowego zadane masowe natężenie przepływu tworzywa determinuje średnicę ślimaka (rys. 5.129), a ta z kolei jest związana z mocą napędu ślimaka (rys. 5.130). Oba rysunki sporządzono na podstawie danych katalogowych 14 firm produkujących wytłaczarki. Podobne zależności w odniesieniu do wytłaczania dwuślimakowego można znaleźć w literaturze [5.118]. Dysponuje się również danymi bardziej szczegółowymi. Na rysunku 5.131 przedstawiono nomogram dotyczący wytłaczania dwuślimakowego stożkowego rur z PVC w postaci proszku o gęstości nasypowej około 600 kg/m^3, opracowany dla wytłaczarek produkcji krajowej, wiążący masowe natężenie przepływu $\dot{G}$ wyrażone w kg/h, masę *M* jednego metra długości rury w kg, przekrój poprzeczny rury *A* w mm^2, prędkość przepływu tworzywa (prędkość liniowa rury) *V* w m/min oraz rodzaj wytłaczarki określony ułamkiem, w którym licznik wyraża średnicę zewnętrzną większą w cm,



Rys. 5.129. Zależność masowego natężenia przepływu od średnicy D ślimaka wytłaczarek; pole zakreskowane omiędzy krzywymi dotyczy wytłaczarek z cylindrem bez owków; w przypadku wytłaczarek z cylindrem rowowanym zaznaczono tylko górny zakres wartości [5.27]

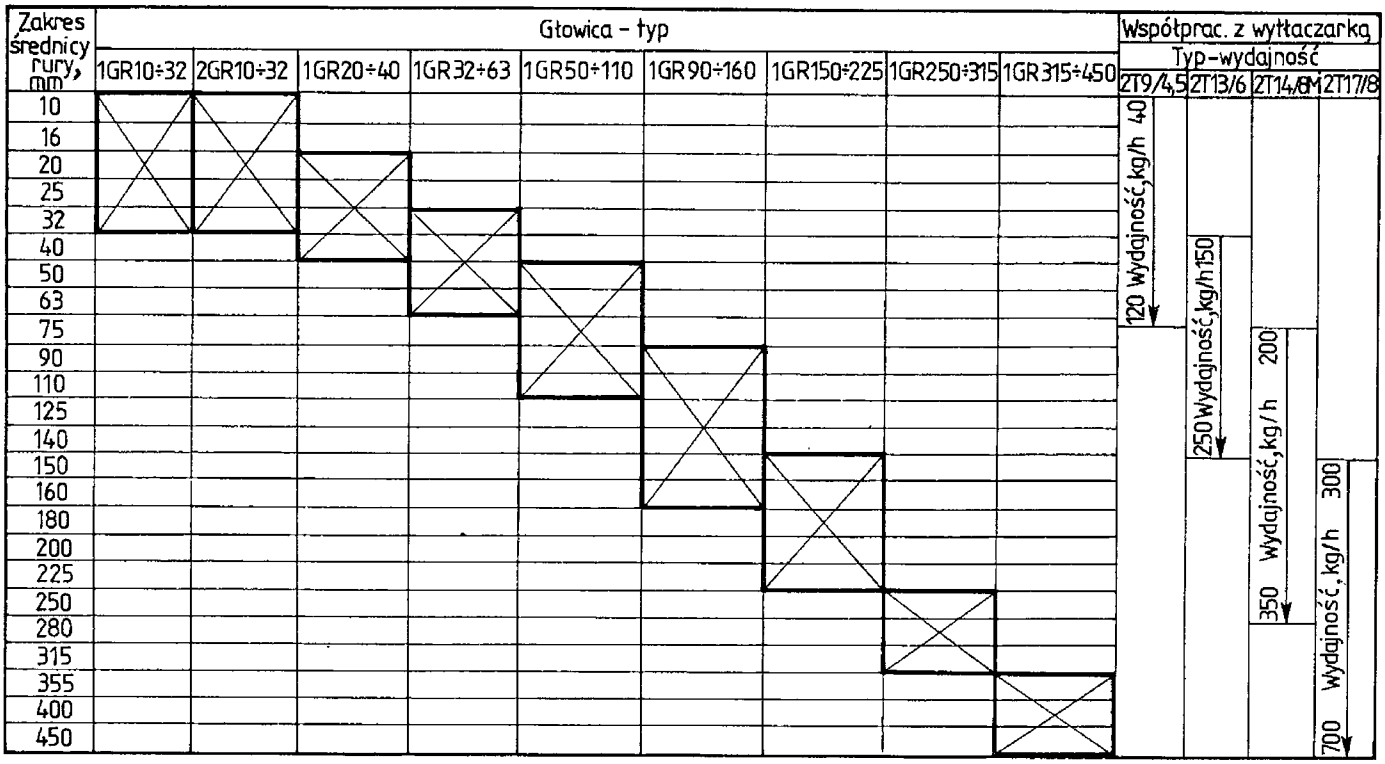


Rys. 5.130. Zależność zainstalowanej mocy napędu $\dot{N}_N$ ślimaka wytłaczarek od średnicy D ślimaka; wartości odniesione do wytłaczarek z cylindrem rowkowanym mieszczą się w polu zakreskowanym bliżej krzywej górnej [5.27]



Rys. 5.131. Nomogram dotyczący wytłaczania dwuślimakowego stożkowego rur z PVC, opracowany w OBR etalchem w Toruniu; oznaczenia w tekście [5.105]

a mianownik średnicę zewnętrzną mniejszą w cm współpracujących ślimaków. Na rysunku 5.132 jest pokazany kolejny nomogram wiążący średnicę rury, typ głowicy wytłaczarskiej do rury, rodzaj wytłaczarki dwuślimakowej stożkowej współpracującej z głowicą i zakres masowego natężenia przepływu (wydajności).



Rys. 5.132. Nomogram dotyczący współpracującego układu: wytłaczarka dwuślimakowa stożkowa — głowica wytłaczarska do rur z PVC, opracowany w OBR Metalchem w Toruniu [5.105]

Zdarza się, że narzędzia przetwórczego i oprzyrządowania technologicznego nie można dobrać i wówczas należy je zaprojektować. Dobierając maszyny, narzędzia, urządzenia uzupełniające i oprzyrządowanie technologiczne bierze się pod uwagę przede wszystkim następujące kryteria: wydajność, stopień mechanizacji i automatyzacji, trwałość, niezawodność i ekonomiczność, jak również warunki ograniczające.

Przyjmuje się, że wszystkie maszyny, narzędzia i urządzenia składowe linii lub stanowisk technologicznych powinny mieć zadaną wydajność, zwaną *wydajnością rzeczywistą*, zapewniającą synchronizację i ciągłość bądź ustaloną cykliczność procesu. W najczęstszym przypadku tworzenia *linii technologicznej o strukturze szeregowej* w znacznym stopniu zautomatyzowanej, wydajność ta powinna być jednakowa — determinowana na ogół przez wydajność maszyny do przeprowadzania podstawowego procesu przetwórstwa lub przez wydajność jednego z urządzeń uzupełniających. Wspomniana w punkcie 5.5.1 wydajność teoretyczna nie uwzględnia nieuniknionych postojów linii lub stanowisk. Wydajność rzeczywista jest więc zawsze mniejsza od wydajności teoretycznej

$$\dot{W}_{rz} = \dot{W}_t \eta \cdot \tag{5.51}$$

lub

$$\dot{G}_{rz} = \dot{G}_t \eta \tag{5.52}$$

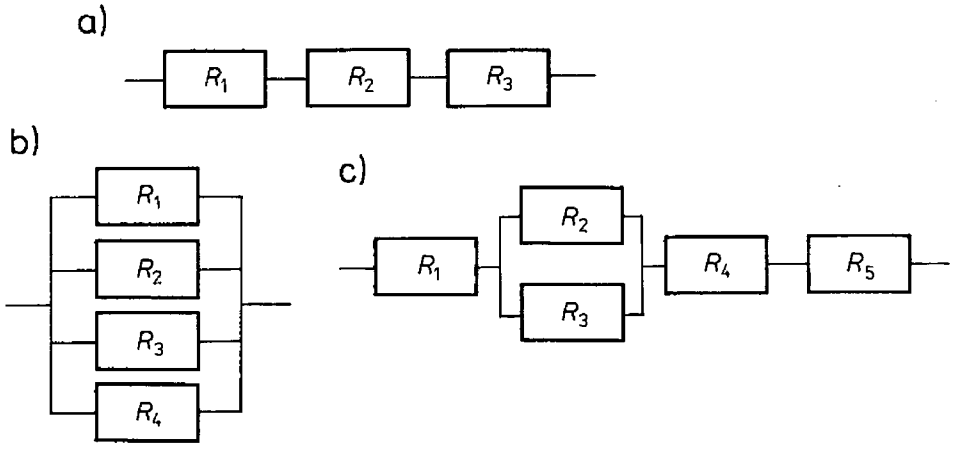
gdzie η jest współczynnikiem wykorzystania linii lub stanowiska technologicznego ($\eta < 1$).

Procesy technologiczne przetwórstwa są już w bardzo dużym stopniu zmechanizowane, ale spotyka się jeszcze operacje technologiczne wykonywane ręcznie. Dąży się oczywiście do tego, aby ich uciążliwość była jak najmniejsza.

Stopień automatyzacji zależy przede wszystkim od zadanej wydajności i uwarunkowań ekonomiczno-organizacyjnych oraz niekiedy od określonych uwarunkowań społecznych. Na ogół ze wzrostem stopnia automatyzacji istotnie powiększa się wydajność i zmniejsza koszt jednostkowy. Współczesne linie i stanowiska technologiczne cechuje duży stopień automatyzacji badź są one całkowicie zautomatyzowane. Coraz większe zastosowanie znajdują roboty przemysłowe.

Jeżeli chodzi o *trwałość*, to rozwiązaniem idealnym byłoby takie, w którym wszystkie maszyny, narzędzia i urządzenia składowe linii oraz stanowisk zużywałyby się w tym samym stopniu, zapewniając jednakową ich trwałość. Rozwiązanie takie jest jednak dotychczas praktycznie niemożliwe. Stąd duże znaczenie ma trwałość całkowita, trwałość do pierwszej odnowy (naprawy) i trwałość pomiędzy poszczególnymi odnowami, zarówno w odniesieniu do całej linii lub stanowiska, jak i do poszczególnych ich elementów składowych.

Niezawodność jest cechą, której miarą jest prawdopodobieństwo pracy poprawnej (bezusterkowej, bezawaryjnej) w określonych warunkach i w danym czasie. Niezawodność R wyraża się funkcją zależną (PN-77/N-04005 i PN-77/N-04010) od czynników wymuszających x, określanych warunkami eksploatacji, i od czasu T użytkowania, czyli $R(x, T)$. Funkcja ta przybiera wartości dodatnie od 0 do 1. Niezawodność maleje w miarę zwiększania obciążenia maszyn, narzędzi i urządzeń uzupełniających.



Rys. 5.133. Układy niezawodności: a) szeregowy, b) równoległy, c) mieszany (szeregowo-równoległy)

Z niezawodnościowego punktu widzenia rozróżnia się (rys. 5.133) układy szeregowe, równoległe i mieszane (szeregowo-równoległe). Całkowita niezawodność układu składającego się z elementów szeregowych nie może być większa niż niezawodność najbardziej zawodnego elementu i układ taki jest tym bardziej zawodny, im więcej ma elementów w szeregu. Całkowitą niezawodność układu szeregowego określa się zależnością

$$R_s = R_1 R_2 R_3 \ldots R_n \tag{5.53}$$

a przy założeniu, że $R_1 = R_2 = R_3 = \ldots = R_i = R$

$$R_s = R^i \tag{5.54}$$

Zwiększenie niezawodności układu szeregowego uzyskuje się przez zwiększenie niezawodności większej liczby elementów składowych. W przypadku układu składającego się z elementów równoległych, prawdopodobieństwo poprawnego działania całego łańcucha jest zawsze większe niż prawdopodobieństwo poprawnego działania najsłabszego elementu (ogniwa). Całkowitą niezawodność układu równoległego wyznacza się z zależności

$$R_r = 1 - [(1 - R_1)\ (1 - R_2) \ldots (1 - R_i)] \tag{5.55}$$

Niezawodność układu równoległego zwiększa się wskutek powiększania niezawodności najsłabszego elementu (ogniwa). Dla układu mieszanego, przedstawionego dla przykładu na rys. 5.133c, całkowita niezawodność wynosi

$$R_m = R_1\{1 - [(1 - R_2)\ (1 - R_3)]\}\ R_4\ R_5 \tag{5.56}$$

W procesie optymalizacji trwałości i niezawodności, funkcją celu powinny być *koszty społeczne*. Pod pojęciem kosztów społecznych rozumie się wszystkie koszty: przetwórstwa, użytkowania, konserwacji, awarii z jej skutkami bezpośrednimi i pośrednimi itd.

Jeżeli wreszcie chodzi o *ekonomiczność*, to maszyny, narzędzia i urządzenia składowe linii oraz stanowisk technologicznych powinny spełniać takie same warunki, jakie przedstawiono podczas omawiania ekonomii przetwórstwa (p. 5.3.1). Istnieją określone powiązania pomiędzy stopniem automatyzacji linii i stanowisk a problemami ekonomiczności i zagadnieniami organizacyjnymi (p. 5.8).

5.7.4. Dokumentacja technologiczna

Dokumentację technologiczną stanowi zbiór dokumentów z danymi, według których prowadzi się proces technologiczny przetwarzania tworzywa. Ogólnie ujmując, dokumentację technologiczną sporządza się w różnej formie i o różnym stopniu szczegółowości. Zależy to przede wszystkim od rodzaju (skali) produkcji określanej wydajnością, w tym zwłaszcza liczebnością jednakowych wytworów lub przetworów, rozwiązania linii bądź stanowisk technologicznych oraz kwalifikacji i doświadczenia pracowników. W warunkach produkcji na dużą skalę za pomocą złożonych linii bądź stanowisk, opracowuje się wiele dokumentów technologicznych ze szczegółowymi danymi. Rozbudowana i szczegółowa dokumentacja jest również potrzebna w przypadku zatrudniania pracowników o niższych kwalifikacjach i mniejszym doświadczeniu.

W skład dokumentacji technologicznej wchodzą głównie następujące opracowania: karta technologiczna, instrukcja procesowa, instrukcja operacyjna, karta kalkulacyjna, instrukcja bezpieczeństwa i higieny pracy, instrukcja kontroli technicznej oraz instrukcja montażu. Opracowania te mogą być wykonywane oddzielnie lub mogą być łączone, np. niekiedy łączy się w jedną całość kartę technologiczną i instrukcję operacyjną.

Karta technologiczna zawiera m.in. rysunek konstrukcyjny i charakterystykę wytworu lub tylko charakterystykę w przypadku przetworu, ze szczególnym uwzględnieniem wymagań jakościowych, rysunek poglądowy zaprojektowanej linii lub stanowiska z zaznaczeniem wszystkich elementów składowych i wskazaniem kierunku przepływu materiałów, wytworów lub przetworów i odpadów technologicznych, spis procesów przetwórstwa i innych wchodzących w skład procesu technologicznego przeprowadzanego za pomocą linii lub stanowiska oraz podstawową charakterystykę techniczną wymienionych elementów składowych. Zawiera również informacje dotyczące zagadnień ekologicznych.

Instrukcja procesowa jest sporządzana dla określonego procesu technologicznego spośród wymienionych w karcie technologicznej, np. dla mieszania, magazynowania, wytłaczania, wtryskiwania, ochładzania, zgodnie ze strukturą linii lub stanowiska. Stanowi ona m. in. spis ułożonych w kolejności operacji technologicznych z ich podstawową charakterystyką. *Operacją* nazywa się część procesu technologicznego przebiegającą na jednym stanowisku pracy, przy jednym narzędziu i oprzyrządowaniu, bez przerw na wykonanie innych części procesu. W konkretnych przypadkach nazywa się instrukcję procesową zgodnie z nazwą procesu, np. instrukcją magazynowania, instrukcją wytłaczania, instrukcją wtryskiwania itd.

Instrukcja operacyjna opracowywana zostaje dla określonej operacji w danym procesie, np. dla operacji „Nastawić parametry wtryskiwania" w procesie „Wtryskiwanie" (tabl. 5.28). Stanowi ona m.in. spis ułożonych w kolejności zabiegów wchodzących w skład operacji z ich charakterystyką lub zestawienie parametrów procesu. *Zabiegiem* nazywa się część operacji, której czynności główne odbywają się w sposób wyodrębniony bez zmiany parametrów.

Karta kalkulacyjna zawiera głównie czasy poszczególnych procesów, operacji i zabiegów. Wykonuje się ją dopiero po opracowaniu całego procesu, gdy dobrane są warunki jego przeprowadzania.

Instrukcja bezpieczeństwa i higieny pracy, zwana krótko *instrukcją bhp*, jest sporządzana na ogół dla całego procesu technologicznego i obejmuje informacje w zakresie postępowania zapewniającego bezpieczną, wygodną, higieniczną i nieszkodliwą pracę z punktu widzenia zdrowia pracowników.

Instrukcję kontroli technicznej sporządza się dla operacji kontrolnych i nie we wszystkich przypadkach. Operacje kontroli występują zwykle pod koniec procesu technologicznego (kontrola końcowa), ale w niektórych przypadkach, zwłaszcza dla wytworów lub przetworów technologicznie trudnych, mogą być przeprowadzane po operacjach ważniejszych (kontrola międzyoperacyjna). W instrukcji podaje się głównie właściwości bądź cechy kontrolowane, ich wartości nominalne, tolerancje i odchyłki dopuszczalne oraz przyrządy pomiarowe.

Tablica 5.28

Przykład instrukcji operacyjnej

Nazwa przedsiębiorstwa	Instrukcja operacyjna	Proces nr 2 Wtryskiwanie
	Operacja nr 3 Nastawić parametry wtryskiwania	

Wtryskarka: Monomat 330 Nr inw.: 7758-11		Nr formy: 5.41.2.589.00	
Przedmiot: 921-029	Nazwa przedmiotu: Obejma	Nr przedmiotu: 76,2390	Materiał przedmiotu: PMM bezbarwny

Temperatura cylindra, °C		Temperatura formy, °C	
strefa I (wejście)	160±20	podzespół stały	60±6
strefy II i III (środek)	220±10	podzespół ruchomy	60±6
strefa IV (wyjście)	230±10		
dysza	200±10		

Czas, s		Ciśnienie, MPa	
cyklu	63	wtryskiwania	78,4
wtryskiwania	55	docisku	49,0
otwartej formy	8	dozowania	1,96
dosuwania	18	zamykania	98,0
odsuwania	37		

Dane wtryskarki	Dane układu uplastyczniającego	
pozycja wtryskarki: pozioma	obroty ślimaka	85 min^{-1}
praca wtryskarki: półautomat	dosuwanie ślimaka	180 mm
wypychacz: mechaniczny	dosuwanie układu	255 mm

Opracował:	Sprawdził:	Zatwierdził:

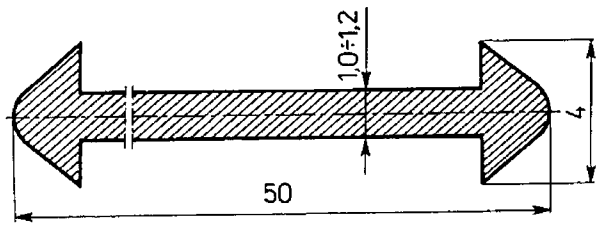
Instrukcja montażu ujmuje przemiany oddzielnie wykonanych wytworów z tworzyw, często w połączeniu z wytworami z innych materiałów w nową jakościowo i funkcjonalnie całość — podzespół, zespół, maszynę lub urządzenie. Musi być przy tym zachowana zasada technologiczności konstrukcji z punktu widzenia montażu. Instrukcja montażu może mieć postać opisową, w której wyszczególnia się kolejność i sposób składania wytworów oraz oprzyrządowanie montażowe, bądź mieć postać opisowo-szkicową, gdzie dodatkowo ilustruje się ważniejsze czynności montażu.

W niektórych przypadkach w skład dokumentacji technologicznej wchodzą również instrukcje specjalne. Są to zazwyczaj szczegółowe instrukcje sporządzane dla operacji, rzadziej zabiegów, trudnych i wymagających szczególnych umiejętności, w których prawdopodobieństwo powstania braków, uszkodzenia narzędzia, maszyny lub urządzeń uzupełniających, a także zagrożenie zdrowia pracowników jest duże. Trzeba

dodać, że pojęcie procesów, operacji i zabiegów trudnych oraz wymagających szczególnych umiejętności jest względne i zależy przede wszystkim od kwalifikacji i doświadczenia pracowników, gdyż np. proces trudny dla pracowników o mniejszych umiejętnościach może się okazać procesem normalnym dla pracowników o dużych umiejętnościach.

5.7.5. Przykłady obliczeniowe

Przykład 5.3. W linii technologicznej wytłaczania PE otrzymuje się wytłoczynę o przekroju poprzecznym pokazanym na rys. 5.134. Do kalibrowania zastosowano urządzenie próżniowe, kalibrujące z dopuszczalną prędkością $v_k = 0{,}067$ m/s. Z wy-



Rys. 5.134. Przekrój poprzeczny wytłoczyny — przekładki resorowej

tłoczyny tej sporządza się przekładki resorowe do samochodów. Plan produkcji kompletów przekładek, wynikający z planu produkcji samochodów (1 komplet — 1 resor — 4 przekładki) wynosi $i = 250\,000$ rocznie. Łączna długość przekładek w jednym komplecie wynosi $L = 3{,}61$ m, a pole przekroju poprzecznego przekładki $A = 6{,}2 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{m}^2$, gęstość polietylenu $\rho = 955\,\mathrm{kg/m}^3$. Obliczyć wydajność rzeczywistą linii oraz sprawdzić, czy zdolność produkcyjna linii zapewnia wykonanie planu produkcji kompletów przekładek.

Rozwiązanie. Wydajność teoretyczną urządzenia kalibrującego oblicza się ze wzoru (5.30) lub (5.41). Podstawiając dane liczbowe uzyskuje się

$$\dot{W}_t = 6{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}067 = 4{,}154 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s} = 4{,}151\ \mu\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

oraz

$$\dot{G}_t = 6{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}067 \cdot 955 = 3{,}967 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{kg/s} = 3{,}967\ \mathrm{g/s}$$

Przy założeniu, że współczynnik wykorzystania linii $\eta = 0{,}85$, wydajność rzeczywista urządzenia kalibrującego, równa wydajności linii, wynosi (5.51) i (5.52)

$$\dot{W}_{rz} = 4{,}151 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}85 = 3{,}531 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s} = 3{,}531\ \mu\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$$

oraz

$$\dot{G}_{rz} = 3{,}967 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}85 = 3{,}372 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m}^3/\mathrm{s} = 3{,}372\ \mathrm{g/s}$$

Zdolność produkcyjna linii w ciągu jednego roku jest określana przez zależność

$$i' = \frac{\dot{W}_{rz} T}{A L}$$

lub

$$i'' = \frac{\dot{G}_{rz} T}{A L \rho}$$

gdzie iloczyn $A L \rho$ oznacza masę kompletu przekładek, a iloczyn $A L$ ich objętość, natomiast T — teoretyczny czas pracy linii w ciągu jednego roku: przy założeniu pracy na dwie zmiany $T = 17{,}28 \cdot 10^6$ s. Podstawiając dane liczbowe do podanych wzorów uzyskuje się

$$i' = \frac{3{,}531 \cdot 10^{-6} \cdot 17{,}28 \cdot 10^6}{6{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot 3{,}61} = 272\,610$$

lub

$$i'' = \frac{3{,}372 \cdot 10^{-3} \cdot 17{,}28 \cdot 10^6}{6{,}2 \cdot 10^{-5} \cdot 3{,}61 \cdot 955} = 272\,600$$

a więc

$$i' > \mathrm{i} \quad \text{oraz} \quad i'' > \mathrm{i}$$

co oznacza, że zdolność produkcyjna linii zaspokaja potrzeby produkcyjne kompletów przekładek.

Przykład 5.4. W linii technologicznej wytłaczania powleka się zmiękczonym PVC kabel elektryczny w postaci drutu o średnicy $d = 1{,}7$ mm z prędkością wytłaczania $v_w = 1{,}67$ m/s. Grubość powłoki wynosi $g = 0{,}4$ mm, gęstość tworzywa $\rho = 1380$ kg/m^3, cena $Z = 13\,000$ zł/kg. Obliczyć jednostkową masę tworzywa, wydajność wytłaczania i koszt jednostkowy oraz wykreślić stosowny nomogram.

Rozwiązanie. Jednostkową masę tworzywa można wyznaczyć z zależności

$$\frac{m}{L} = m_j = \frac{\pi (D^2 - d^2) \rho}{4}$$

gdzie

$$D = d + 2g$$

L zaś oznacza długość powlekanego drutu. Podstawiając dane liczbowe otrzymuje się

$$m_j = \frac{\pi (0{,}0025^2 - 0{,}0017^2)\, 1380}{4} = 3{,}641 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m} = 3{,}641 \text{ g/m}$$

a więc masa tworzywa potrzebna do powleczenia 1 m drutu wynosi 3,641 g. Wydajność wytłaczania określa wzór

$$\dot{G} = m_j \, v_w$$

zatem po podstawieniu danych liczbowych

$$\dot{G} = 3{,}641 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}67 = 21{,}89 \text{ kg/h}$$

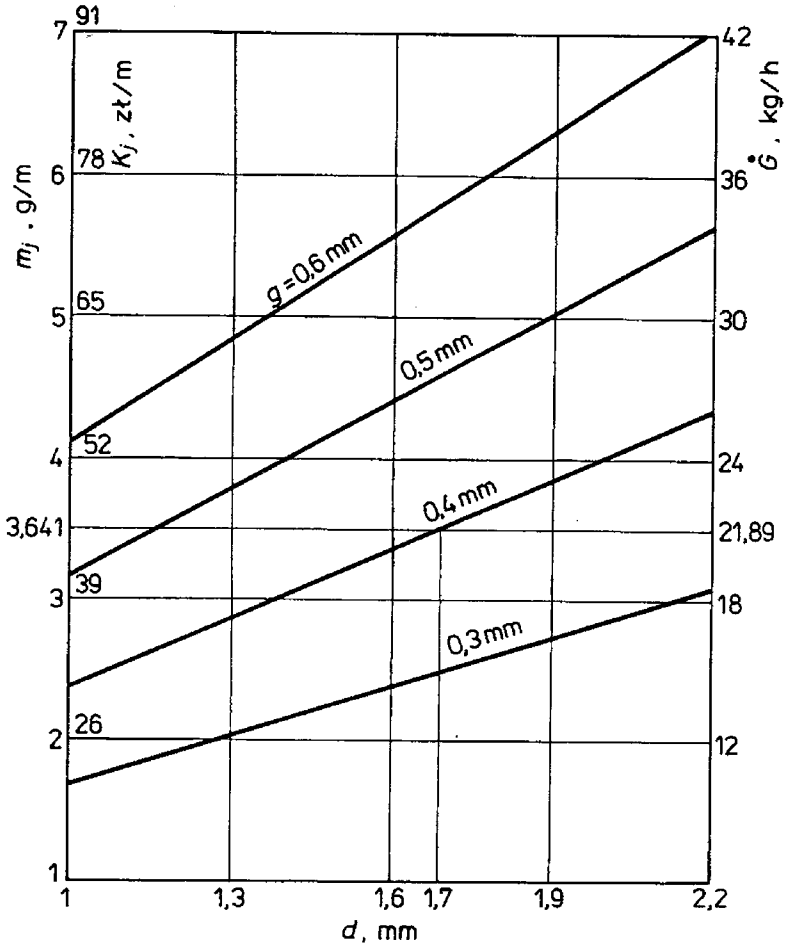
Koszt jednostkowy wyznacza się ze wzoru

$$K_j = m_j Z$$

a więc

$$K_j = 3{,}641 \cdot 10^{-3} \cdot 13\,000 = 47{,}333 \text{ zł/m}$$

Przyjmuje się, że nomogram powinien umożliwiać wyznaczanie obliczonych wielkości w zależności od średnicy drutu i grubości powłoki. Nomogram taki sporządzony na podstawie podanych obliczeń przedstawiono na rys. 5.135.



Rys. 5.135. Nomogram do wyznaczania zależności istotnych podczas wytłaczania powlekającego, sporządzony dla warunków podanych w przykładzie obliczeniowym 5.4

Przykład 5.5. Daną wypraskę dwukolorową można otrzymać w dwóch różnych procesach technologicznych: wariant I — wtryskiwanie konwencjonalne w celu otrzymania zapraski tworzywowej oraz następnie wtryskiwania wypraski z wcześniej uzyskaną zapraską, wariant II — wtryskiwanie dwukolorowe. Koszty bezpośrednie w wariancie I wynoszą $a_1 = 0{,}22$ jednostki pieniężne, natomiast koszty pośrednie $b_1 = 15\,000$ jednostek pieniężnych. Koszty bezpośrednie w wariancie II wynoszą $a_2 = 0{,}07$ jednostek pieniężnych, a koszty pośrednie $b_2 = 50\,000$ jednostek pieniężnych. Wyznaczyć liczbę graniczną X_{gr} wyprasek, przy której koszty własne w obu wariantach są sobie równe.

Rozwiązanie. Korzystając ze wzoru (5.49) można napisać

$$K_{w1} = K_{w2}$$

zatem

$$a_1 X_{gr} + b_1 = a_2 X_{gr} + b_2$$

stąd

$$X_{gr} = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}$$

Po podstawieniu danych liczbowych

$$X_{gr} = \frac{50\,000 - 15\,000}{0{,}22 - 0{,}07} = 233\,333$$

Oznacza to, że dla liczby wyprasek mniejszej od 233 333 sztuk ekonomiczniejsze jest wtryskiwanie dwukrotne konwencjonalne, a dla liczby wyprasek większej od 233 333 ekonomiczniejsze jest wtryskiwanie dwukolorowe.

5.8. Organizacja linii i stanowisk

Organizacja linii i stanowisk, na których przeprowadza się procesy technologiczne przetwórstwa tworzyw, jest elementem składowym ogólnej problematyki organizacji produkcji, a zwłaszcza *organizacji procesów produkcyjnych*. Literatura ogólna na te tematy oraz ukierunkowana na obróbkę metali jest obszerna. Literatura dotycząca przetwórstwa tworzyw jest nader skromna, a jedyną pozycją zwartą pozostaje nadal książka R. Krzykawy z 1969 r. [5.62], mająca już tylko znaczenie historyczne.

5.8.1. Podstawy organizacji

Rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje przedsiębiorstw, w których przetwarza się tworzywa, a mianowicie:

a) przedsiębiorstwa, w których produktem finalnym jest wytwór lub przetwór z tworzywa, czyli przedsiębiorstwa przetwórcze, np. przedsiębiorstwa produkujące elementy z tworzyw do przemysłu motoryzacyjnego, okrętowego, chemicznego, do budownictwa, rolnictwa, gospodarstwa domowego, medycyny, sportu;

b) przedsiębiorstwa, w których wytwarza się wytwory lub przetwory z tworzyw, następnie montuje się je w podzespoły i zespoły, na ogół z elementami z innych materiałów (głównie metali), lub użytkuje się je podczas montażu (dotyczy to głównie przetworów), a często podzespoły i zespoły montuje się z kolei w gotowe do eksploatacji maszyny i urządzenia, np. przedsiębiorstwa produkujące lodówki, radia, telewizory, maszyny rolnicze, samochody, okręty.

Nazwy systematyczne, nie handlowe lub obiegowe, przedsiębiorstwa lub jego wydziałów bądź oddziałów w przypadku pierwszym i wydziałów bądź oddziałów w przypadku drugim tworzy się od nazw podstawowych procesów przetwórstwa wchodzących w skład linii lub stanowisk. Zatem przedsiębiorstwo, wydział lub oddział przetwórstwa może nazywać się np. spawalnia, zgrzewalnia, suszarnia, porowalnia, wytłaczalnia, wtryskownia, prasownia, laminownia, kalandrownia, przędzalnia, odlewnia, spienialnia, klejalnia, drukarnia.

W obu przypadkach organizacja linii i stanowisk technologicznych przetwórstwa tworzyw jset bardzo zróżnicowana i zależy w sposób istotny od podstawowego procesu przetwórstwa, rodzaju produkcji, rozwiązania linii lub stanowiska technologicznego oraz ogólnej organizacji i możliwości lokalowych, jak również kadrowych

Rys. 5.136. Wygląd ogólny liniowego ciągu produkcyjnego wtryskiwania

przedsiębiorstwa, w którym przetwarza się tworzywa. Zasady organizacji linii i stanowisk są zgodne z ogólnymi zasadami organizacji produkcji, a szczególnie organizacji procesów produkcyjnych.

Pomieszczenia robocze przedsiębiorstwa, wydziału lub oddziału przetwórstwa muszą być wyposażone w instalację elektryczną jedno- i trójfazową, instalację wentylacyjną ewentualnie klimatyzacyjną, sprężonego powietrza oraz w instalację wody chłodzącej w obiegu zamkniętym.

Jednym z najważniejszych zadań przy organizacji linii i stanowisk technologicznych jest rozmieszczenie linii i stanowisk oraz ich elementów składowych i towarzyszących, jak również wzajemne powiązania strukturalne w tym zakresie. W takim ujęciu wspomniane rozmieszczenie powinno zapewniać m.in. maksymalną oszczędność powierzchni produkcyjnej poprzez zastosowanie najwłaściwszego, z punktu widzenia przebiegu procesów technologicznych i pomocniczych, rozstawienia linii i stanowisk oraz ich elementów składowych oraz towarzyszących, minimalne przestoje maszyn, narzędzi i urządzeń, dostęp do maszyn, narzędzi i urządzeń potrzebny ze względów eksploatacji, głównie obsługiwania, wystarczające pole odkładcze dla prac w toku, możliwości niezbędnego — najmniejszego przepływu materiałów oraz ich załadunków i rozładunków, jak również bezpieczeństwo, higienę pracy oraz warunki ergonomiczne.

Istnieje wiele metod rozmieszczania linii i stanowisk; w części z nich stosuje się rachunek optymalizacyjny, część zaś jest zaliczana do metod heurystycznych. Poszczególne metody różnią się między sobą dokładnością uzyskanych wyników i czasem trwania obliczeń. Metody ścisłe wymagają określonych założeń, długiego czasu obliczeń, często stosowania złożonej techniki komputerowej, dlatego ich przydatność jest ograniczona. W praktyce stosuje się więc zazwyczaj metody uproszczone. Szczegóły można znaleźć w literaturze poświęconej tym zagadnieniom.

Rozmieszczenie większej liczby linii bądź stanowisk technologicznych tego samego albo podobnego rozwiązania stanowi *ciąg produkcyjny* lub *gniazdo produkcyjne*. Wygląd jednego z takich ciągów przedstawiono na rys. 5.136.

Przyjmuje się zazwyczaj umownie w rozwiązaniach inżynierskich, że wszystkie zależności występujące przy organizacji linii i stanowisk mają charakter zdeterminowany. Są jednak i takie czynniki, które występują i przebiegają losowo i których przewidywanie jest znacznie utrudnione lub wręcz niemożliwe. Oznacza to, że organizacja linii i stanowisk jest funkcją wielu zmiennych, z których niektóre mają charakter probabilistyczny. Takie podejście, aczkolwiek bardziej ścisłe, powoduje dużą złożoność problematyki, a zwłaszcza komplikuje obliczenia.

5.8.2. Rozwiązania organizacyjne

W przedsiębiorstwie przetwarzającym tworzywa lub przetwarzającym i montującym podzespoły bądź zespoły można wyróżnić charakterystyczne, przenikające się wzajemnie strefy [5.84, 5.114, 5.116]:

— produkcyjną, obejmującą halę przetwórstwa i halę prac pomocniczych oraz montażowych, z transportem wewnętrznym i niezbędnymi instalacjami,

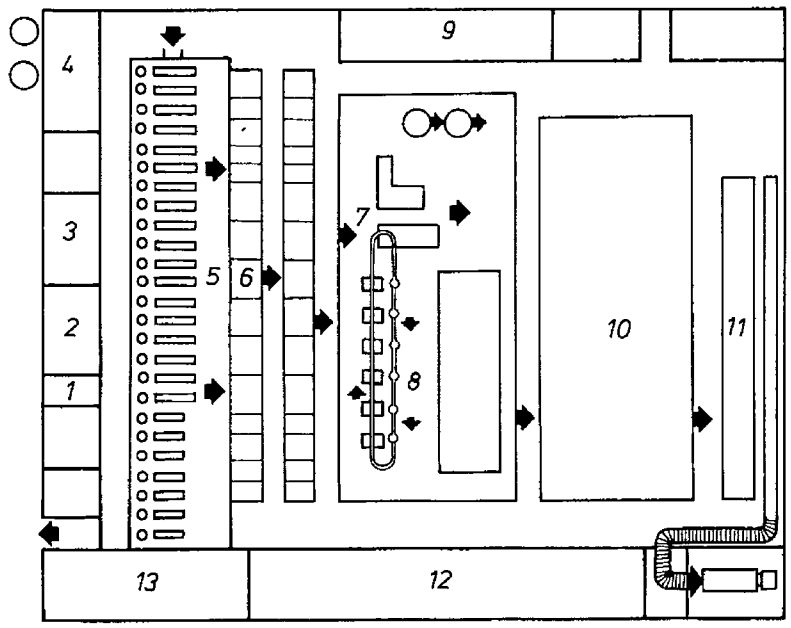
— rozładowczo-magazynową, w której skład wchodzi często rampa kolejowa i środek transportu tworzywa aż do linii lub stanowisk,

— energetyczno-zasilającą, z węzłem wodno-kanalizacyjnym i chłodzącym,

— pozaprodukcyjną, obejmującą głównie budynki administracyjne i socjalne.

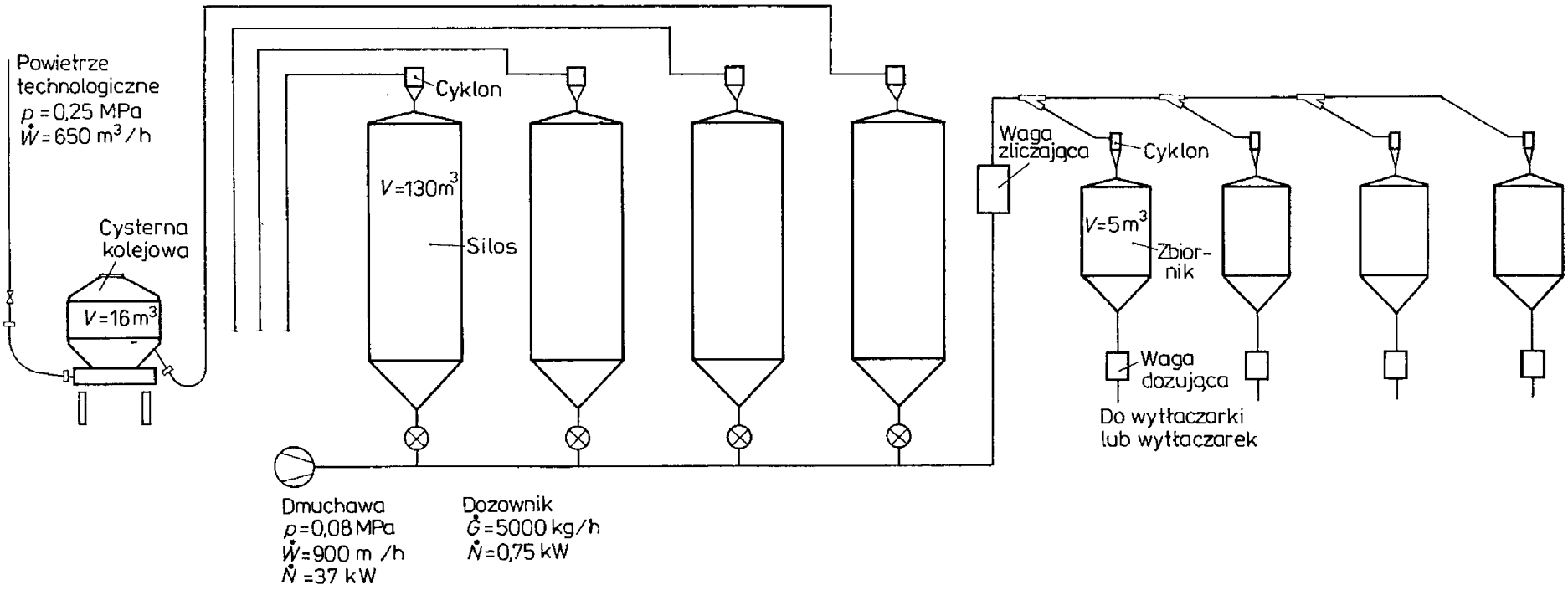
Na rysunku 5.137 przedstawiono przykładowo schemat wtryskowni ze stanowiskami technologicznymi rozmieszczonymi tak, że tworzą dwa liniowe ciągi produkcyjne.

Do przedsiębiorstwa, wydziału lub oddziału tworzywo jest dostarczane w większych ilościach cysternami kolejowymi lub samochodowymi, natomiast w mniejszych ilościach w workach, beczkach, puszkach, butelkach i pojemnikach specjalnych, również transportem kolejowym bądź samochodowym. Droga tworzywa od stacji rozładowczej do poszczególnych linii lub stanowisk technologicznych jest bardzo zróżnicowana, zależna przede wszystkim od stanu skupienia i postaci w obrębie danego stanu, a także od ilości tworzywa. Schemat takiej drogi w przypadku wytłaczalni o łącznej wydajności 5000 kg/h, do polietylenu w postaci granulatu, jest

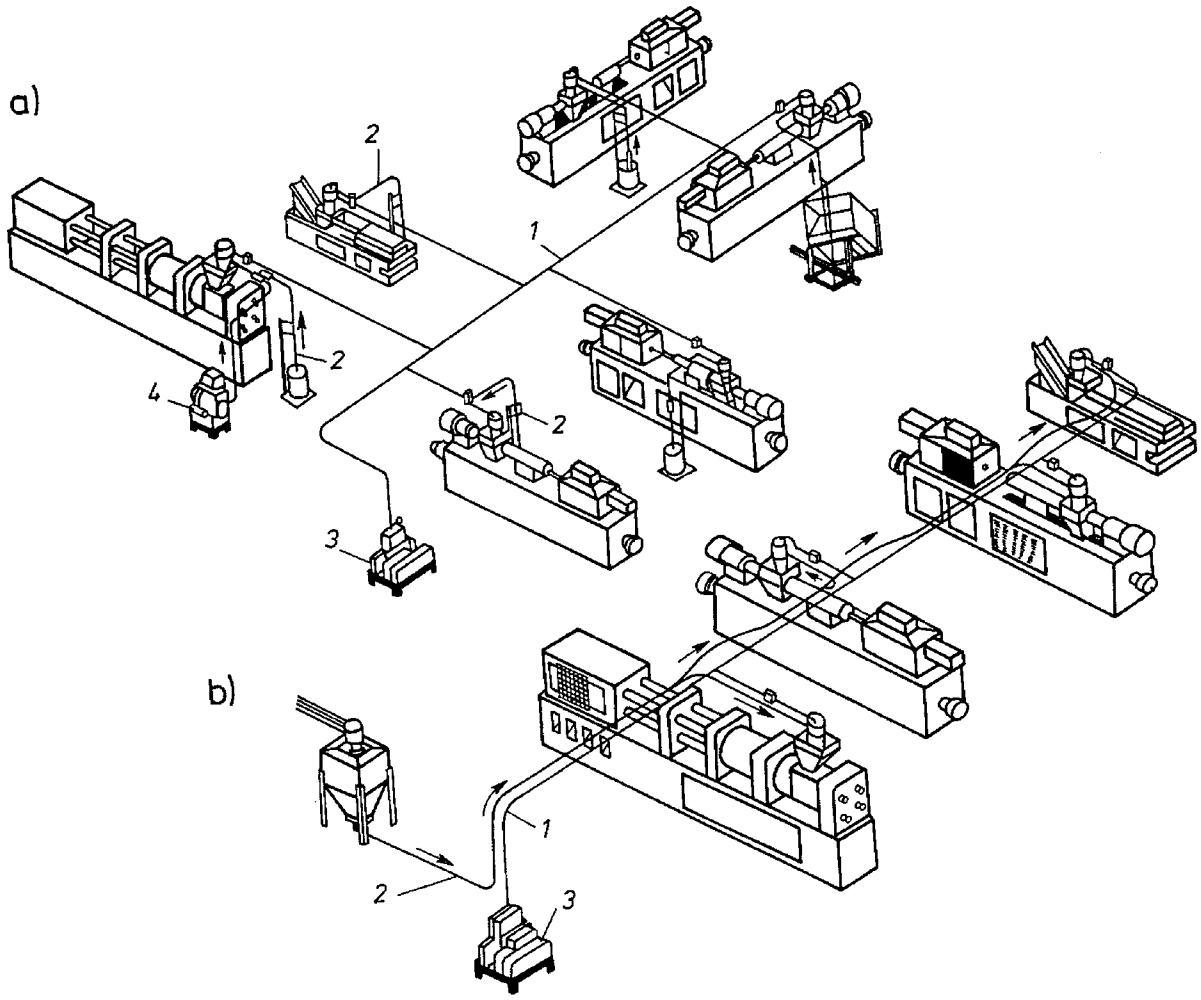


Rys. 5.137. Schemat wtryskowni: *1* — biuro, *2* — warsztat, *3* — magazyn form, *4* — przygotowanie tworzywa wtryskiwanego, *5* — wtryskarki rozmieszczone liniowo, *6* — składowanie międzyoperacyjne, *7* — pakownia, *8* — kontrola, *9* — magazyn tworzywa, *10* — magazyn wyprasek gotowych, *11* — ekspedycja, *12* — biuro, *13* — stołówka

pokazany na rys. 5.138. Tworzywo jest dostarczane cysternami kolejowymi i transportowane pneumatycznie nadciśnieniowo rurociągami poprzez cyklony do silosów, następnie również pneumatycznie nadciśnieniowo transportowane poprzez silosy do zbiorników i dalej grawitacyjnie do zasobników poszczególnych wytłaczarek. Na drodze pomiędzy silosami i cyklonami zbiorników znajduje się waga automatyczna zliczająca, umożliwiająca pomiar masy przepływającego tworzywa w jednostce czasu, natomiast bezpośrednio przed wprowadzeniem do zasobników wytłaczarek znajdują się wagi automatyczne, np. tensometryczne, odważające cyklicznie określone partie tworzywa i sumujące ich ilości (wagi dozujące). Proces transportowania pneumatycznego nadciśnieniowego jest charakteryzowany kilkoma wielkościami, z których można wyróżnić jednostkowe zużycie energii, będące stosunkiem energii całkowitej potrzebnej do transportowania do iloczynu masy przetransportowanego tworzywa i długości drogi transportu (tabl. 5.29). Transportowanie pneumatyczne tworzyw zgranulowanych może być również podciśnieniowe — Whitlocka, w dwóch zasadniczych rozwiązaniach, jak to pokazano w przypadku wtryskowni na rys. 5.139.



Rys. 5.138. Schemat układu transportowania pneumatycznego nadciśnieniowego granulatu PE (Biuro Projektów ZCh Blachownia w Kędzierzynie-Koźlu)



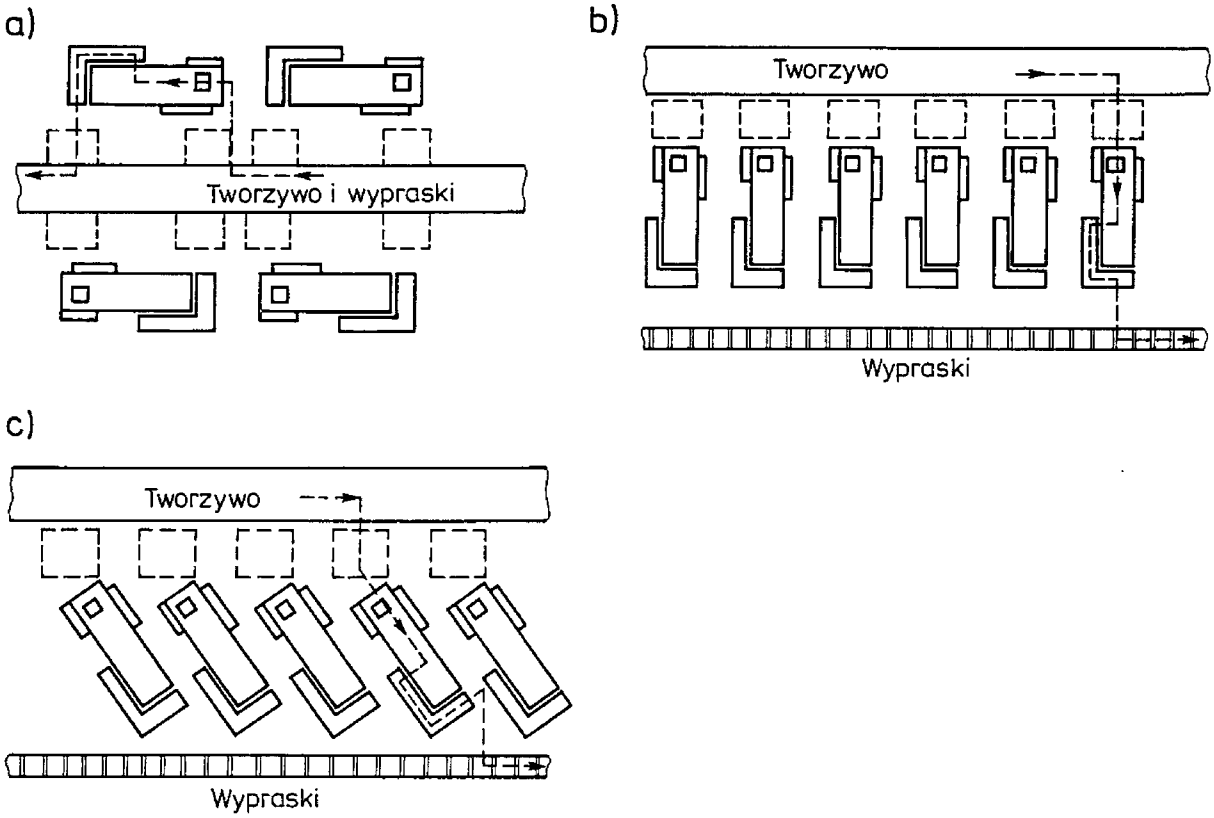
Rys. 5.139. Schemat układu transportowania pneumatycznego podciśnieniowego tworzyw zgranulowanych (układu Whitlocka): a) centralna sieć podciśnienia z indywidualnym doprowadzeniem tworzywa do wtryskarek, b) centralna sieć podciśnienia z centralnym doprowadzeniem tworzywa do wtryskarek; *1* — sieć podciśnienia, *2* — rurociągi z tworzywem, *3* — pompa próżniowa, *4* — granulator (młyn nożowy do tworzyw wtórnych)

Maszyny przetwórcze w ciągu produkcyjnym są ustawiane w stosunku do głównej drogi transportowej równolegle, prostopadle lub kątowo, co w przypadku wtryskarek pokazano na rys. 5.140. Z kolei na rys. 5.141 jest przedstawiony schemat ciągu produkcyjnego prasowni z prasami hydraulicznymi wielopółkowymi, ustawionymi prostopadle do głównej drogi transportowej.

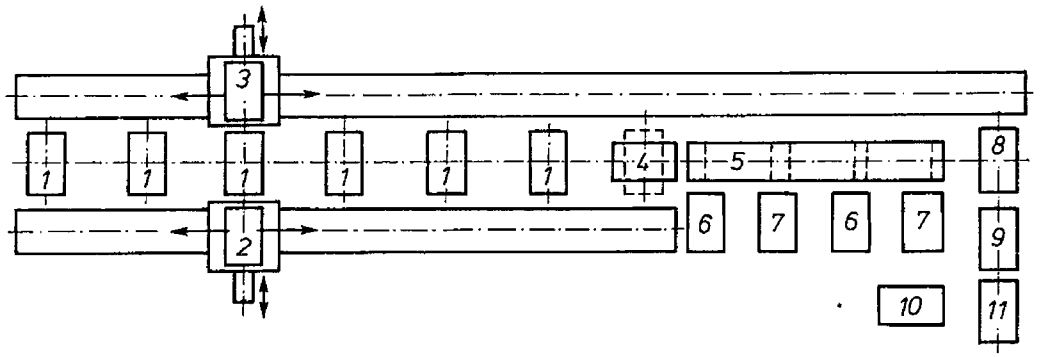
Tablica 5.29

Wartości jednostkowego zużycia energii całkowitej podczas transportowania pneumatycznego nadciśnieniowego granulatu polietylenu i polichlorku winylu w Wh/(kg·m) [5.90]

Rodzaj tworzywa / *L*, m	PE-LD	PVC Polwinit SOS
250	0,0145	0,0162
500	0,0102	0,0118



Rys. 5.140. Podstawowe możliwości ustawienia wtryskarek w ciągu produkcyjnym: a) równoległe, b) prostopadłe, c) kątowe



Rys. 5.141. Schemat ciągu produkcyjnego prasowni do realizacji prasowania wysokociśnieniowego płyt: *1* — prasy hydrauliczne wielopółkowe, *2* — wózek załadowczy, *3* — wózek wyładowczy, *4* — stół podnośny na stanowisku składania pakietów, *5* — przenośnik rolkowy, *6* — preimpregnaty arkuszowe, *7* — blachy przekładkowe, *8* — stół podnośny na stanowisku rozkładania pakietów, *9* — przenośnik rolkowy do wyładowania płyt, *10* — blachy transportowe, *11* — gotowe płyty [5.12]

POLITECHNIKA POZNAŃSKA BIBLIOTEKA GŁÓWNA W POZNANIU

Literatura

5.1. Alf E.: Developments in stretch blow molding of PVC and PP. *Plastics and Rubber Processing and Application* 1/1982.
5.2. Automatische Flachfoliendüse mit Piezotranslatoren. *Kunststoffe* 7/1988.
5.3. „Automatisierung in der Kunststoffverarbeitung" (praca zbiorowa pod red. G. Mengesa i H. Reckera). Carl Hanser Verlag, München – Wien 1986.
5.4. Axentowicz M.: Tolerancje wymiarowe wyrobów z tworzyw sztucznych. *Mechanik* 8/1967.
5.5. „Blasformen von Polypropylen" (praca zbiorowa). VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1980.
5.6. Blohm G.: Wpływ makrostruktury na właściwości wyprasek wtryskowych z poliamidu 6 wzmocnionego krótkimi włóknami szklanymi. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988.
5.7. Błaszkowski K. i inni: „Zasady projektowania oprzyrządowania technologicznego". PWN, Warszawa 1981.
5.8. Bogdaszewski H.: Zagadnienie produkcji rur z polipropylenu na wytłaczarkach jednoślimakowych. *Polimery* 6–7/1982.
5.9. Brach B.: Doskonalenie technologii produkcji rur z PVC. *Przemysł Chemiczny* 3/1987.
5.10. Bragiński A. i inni: International abgestimmte Auswahlreihe von Masstoleranzen für Plastformteile der Mitgliedsländer des RGW. *Plaste und Kautschuk* 4/1977.
5.11. Brinksschröder F.I.: Profilextrusion schmelzeinstabiler Thermoplaste. *Kunststoffe* 3/1981.
5.12. Brzeziński J.: „Laminaty termoutwardzalne". WNT, Warszawa 1963.
5.13. Bursa J.: „Rury stalowe z powłokami z tworzyw sztucznych". WNT, Warszawa 1973.
5.14. Ceglińska J., Michalski K.: Metody zgrzewania elementów z termoplastycznych tworzyw sztucznych. *Mechanik* 2/1980.
5.15. Ceglińska J., Michalski K.: Wytłaczanie rur z poliolefin. *Mechanik* 4/1982.
5.16. Christen W.: Industrie-Roboter beschickt Entgratstationen. *Kunststoffe* 3/1984.
5.17. Chwalisz B., Chwalisz L.: Skurcz tworzyw sztucznych — pojęcia i zależności. *Polimery* 11–12/1981.
5.18. Ciesielski L., Olewiński P., Laskowski M.: Formowanie metodą ciągłą profili z tworzyw sztucznych wzmocnionych szkłem. *Przegląd Mechaniczny* 15/1976.
5.19. Ciołczyk H., Lewandowski W.: Urządzenie wagowe umożliwiające automatyczną pracę maszyn technologicznych (wtryskarek). *Pomiary — Automatyka — Kontrola* 2/1981.
5.20. Coextrusion slow film line makes 5-layer films out four materials. *Modern Plastics International* 11/1983.
5.21. Czarnocki K., Kassur M.: Przetwórstwo polietylenu w Warszawskiej Fabryce Tworzyw Sztucznych „Pollena" w latach 1959–1977. *Polimery* 8–9/1978 oraz patent polski nr 95757.
5.22. Dahlig W., Diem T.: Technologia otrzymywania folii rękawowych z polietylenu małej gęstości z zastosowaniem ciekłych czynników chłodzących. *Polimery* 8–9/1978.
5.23. Daniels U., Hamer B., Hannebaum A.: Einfluss des Beschichtens von Spritzgiesswerkzeugen auf die Entformungskraft. *Kunststoffe* 1/1989.
5.24. Daubenbüchel W.: Extrusions-Streckblasen von PVC. *Plastverarbeiter* 10/1983.
5.25. Dembek H.: Współczesne kierunki rozwoju metod produkcji pojemników z tworzyw sztucznych. *Chemik* 10/1987.
5.26. Der Extruder — Grundlage für Qualität und Wirtschaftlichkeit. *Plastverarbeiter* 7/1989.
5.27. Diakun J.: Porównawcza analiza danych technicznych wytłaczarek jednoślimakowych. *Polimery* 7–8/1990.
5.28. Eiselen O.: Verfahrenstechnik beim Coextrusions-Blasformen. *Kunststoffe* 7/1988.
5.29. Осилов Н.В.: „Механизация и автоматизация переработки пластмасс на принципе выносной прессформы". Изд. Магиностроение, Москва 1971.
5.30. Fertigung von verstärkten Weich-PVC-Schläuchen. *Syntetic* 12/1978.
5.31. Филатов В.И.: „Технологическая подготовка производства пластмассовых деталей". Изд. Машиностроение, Ленинградское отделение 1976.
5.32. Fischer P.: Single screw extruders — state of the art in W. Europe. *European Plastics News* 2/1984.

5.33. Formmassen Lieferprogramm. Opracowanie firmy Bakelite Kunststoffe (Niemcy).
5.34. Gajewski M. i inni: Granulacja tłoczywa melaminowego metodą ciągłą. *Polimery* 4/1978.
5.35. Giegerich V.: Messung der Mischgüte von Extrudaten. *Plastverarbeiter* 12/1972.
5.36. Glossy TiN plating adds life to molds. *Modern Plastics International* 12/1989.
5.37. Glynn D.: Blowit with nitrogen. *Plastics and Rubber Weekly* 727/1978.
5.38. Golden P.: Robots prove themselves an essential element in effective molding lines. *Modern Plastics International* 2/1990.
5.39. 75 Grundregeln für die Herstellung von Spritzgussteilen hoher Massgenauigkeit aus Thermoplasten. *Plaste und Kautschuk* 2/1977.
5.40. „Guma. Poradnik inżyniera i technika" (praca zbiorowa). WNT, Warszawa 1981.
5.41. Hachmann H.: Polyamide als Werkstoffe für den Maschinenbau. Opracowanie firmy BASF (Niemcy).
5.42. Hawrylecka U.: Skurcz wtryskowy jako kryterium oceny jakości wyprasek. *Polimery* 9/1988.
5.43. Heropolitański A., Stachowiak R.: Sieciowanie radiacyjne rur termokurczliwych. *Przegląd Mechaniczny* 10/1983.
5.44. High-Tech für flexibles Spritzgiessen. *Plastverarbeiter* 3/1987.
5.45. Jung P., Patzschke H.: „Spritzgiessen von Termoplasten". VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1988.
5.46. Kalbarczyk J.: Metoda oceny i analiza wykorzystania wtryskarek w zakładach przetwórczych. „Wtrysk termoplastów". Wyd. Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP, Warszawa 1983.
5.47. Калинцев В.А., Макаров М.С.: „Намотные стеклопластики". Изд. Химия, Москва 1986.
5.48. Kaliske G., Erber M., Mayer F.: Grundsätzliches zur Problematik der Massänderungen bei glasfaserverstärkten Thermoplasten von Kurzfasertyp. *Plaste und Kautschuk* 11/1978.
5.49. Kau H.T.: Failure behavior of SMC in high-speed impact. *Modern Plastics Inernational* 7/1990.
5.50. Kleindienst U.: Warmeübergangszahlen beim Kalibrieren und Kühlen von extrudierten Kunststoffrohren. *Plastverarbeiter* 10/1977.
5.51. Kleindienst U., Uhland E.: Optimieren von Extrudern. *Kunststoffe* 10/1973.
5.52. Konzepte für Verfahrensoptimierung. Opracowanie firmy Battenfeld (Niemcy).
5.53. Kowalski Z.: „Powłoki z tworzyw sztucznych". WNT, Warszawa 1973.
5.54. Kowalski Z., Kozłowski A.: „Taśmy metalowe z pokryciami organicznymi". WNT, Warszawa 1970.
5.55. Kowalska E. i inni: Badania wielkości skurczu przetwórczego Tarnoformu w zależności od parametrów wtrysku tworzywa. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988.
5.56. Koszkul J.: Formy do rozdmuchiwania wyrobów z termoplastycznych tworzyw sztucznych. *Mechanik* 1/1972.
5.57. Krajowa technologia wytwarzania taśm termokurczliwych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 6/1984.
5.58. Królikowski W.: Kierunki rozwoju tworzyw wzmocnionych. *Polimery* 9/1989.
5.59. Królikowski W.: Niektóre problemy formowania poliestrowych tworzyw wzmocnionych w formach zamkniętych pod ciśnieniem. „Kierunki modyfikacji technicznych tworzyw sztucznych i ich przetwórstwo". OBR Proplast w Poznaniu, Rydzyna 1986.
5.60. Królikowski W.: Poliestrowe tłoczywa wzmocnione — kierunki rozwoju i stan w Polsce. *Polimery* 10/1985.
5.61. Królikowski W., Kłosowska-Wołkowicz Z., Penczek P.: „Żywice i laminaty poliestrowe". WNT, Warszawa 1986.
5.62. Krzykawa R.: „Organizacja oddziałów tworzyw sztucznych". WNT, Warszawa 1969.
5.63. Kuzia A., Nassalski A.: „Systemy pakowania w folie kurczliwe". WNT, Warszawa 1978.
6.64. Langer R.: Der richtige Kunststoffpartner. *Maschinenmarkt* 28/1972.
5.65. Lewin A.N., Biezchodarnyj N.F.: „Urządzenia produkcyjne zakładów przetwórstwa tworzyw sztucznych". PWT, Warszawa 1956.
5.66. Lohrbächer V., Hoven-Nievelstein W.B.: Extrusionsblasformen. *Kunststoffe* 10/1988.
5.67. Lustre termoplastiche protette con PVdF. *Materiale Plastice Elastomeri* 1/1988.
5.68. Łazarski Z.: Przystosowanie wytłaczarek ślimakowych do wytłaczania i rozdmuchiwania polietylenu wysokociśnieniowego. *Polimery* 8/1969.

5.69. Łączyński B.: „Maszyny przetwórcze tworzyw sztucznych". PWSZ, Warszawa 1967.
5.70. Łączyński B.: „Metody przetwórstwa tworzyw sztucznych". WNT, Warszawa 1973.
5.71. Łączyński B.: „Niemetalowe elementy maszyn". WNT, Warszawa 1988.
5.72. Maciaszek S.: „Syntetyczne tworzywa porowate". WNT, Warszawa 1963.
5.73. Mai M., Veit R.: Materiały 21-AVK Tagung, Meinz 1987.
5.74. Małaśnicki J.: Technologia wytwarzania laminatu z udziałem folii Al i PE-LD oraz tub z tego materiału jako alternatywa tub aluminiowych. *Opakowanie* 4/1988.
5.75. Mapleston P.: For bottle blow molders, there's never been a better time to look at ISBM. *Modern Plasics International* 6/1989.
5.76. Maszyna PT-64 do pakowania w folie. *Polimery* 3/1978.
5.77. Menges G.: Fertigung von Erzeugnissen aus Kunststoffen. *Kunststoffe* 10/1985.
5.78. Michaeli W.: „Extrusionswerkzeuge für Kunststoffe". Carl Hanser Verlag, München–Wien 1979.
5.79. Molding, filling system opens new markets in PE ampoules. *Modern Plastics International* 4/1979.
5.80. Mrowiec M., Urban M.: Problemy suszenia tworzyw sztucznych. *Przemysł Chemiczny* 1/1983.
5.81. News from Japan in Extrusion, Blow, Molding, Thermoforming, Materials. Extrusion. *Plastics Technology* 10/1984.
5.82. Niewiarowski Z.: Kalibrowanie i chłodzenie rur wytłaczanych z tworzyw sztucznych. *Mechanik* 3/1982.
5.83. Nowaczek W., Królikowski W.: Wpływ zagęszczania chemicznego tłoczyw poliestrowych na ich właściwości. *Polimery* 1–2/1990.
5.84. Оленев Б.А., Мордкович Е.М., Коломин В.Ф.: „Проектирование производств литейных изделий из пластмасс". Изд. Химия, Москва 1977.
5.85. Patent niemiecki-RFN nr 1454757.
5.86. Patent niemiecki-RFN nr 1679809.
5.87. Patent polski nr 144698.
5.88. Peelable polypropylene layers make coextrusions suitabled for sterile packaging. *Modern Plastics International* 11/1982.
5.89. Petrykowski A., Axentowicz M.: „Zasady konstruowania wyprasek". Wyd. SIMP, Warszawa 1971.
5.90. Piątkiewicz Z., Olejniczak H., Kowalski E.: Transport pneumatyczny tworzyw granulowanych. *Polimery* 7/1984.
5.91. Pik J.Sz.: „Produkcja wyrobów z tworzyw sztucznych". PWT, Warszawa 1956.
5.92. Planetary roller extrudes 4000 kg of film an hour. *Modern Plastics International* 5/1989.
5.93. Polański Z.: „Metody optymalizacji w technologii maszyn". PWN, Warszawa 1977.
5.94. PP Bottles blown with liquid to be packed. *Popular Plastics and Rubber* 11/1979.
5.95. Press-Info firmy Battenfeld (Niemcy), marzec 1988 r.
5.96. Press-Info firmy Battenfeld (Niemcy), kwiecień 1988 r.
5.97. Programmable robots: present trends and applications. *European Plastics News* 4/1987.
5.98. Prospekty firmy Ing. I. Dolci (Włochy).
5.99. Prospekty firmy Kautex Maschnienbau GmbH (Niemy).
5.100. Reitemeyer P., Klahre M.: Extrusion von Flachfolien, Tiefziehfolien und Tafeln. *Kunststoffe* 10/1988.
5.101. Rozdział P.: „Tworzywa sztuczne w elektronice". WNT, Warszawa 1970.
5.102. Самойлов А. В., Расчёт тянущих усилий для трудных экструзённых установок. *Пластические Массы* 9/1983.
5.103. Schenkel G.: Ansätze zur Optimierung in der Kunststoff-Extrudertechnik. *Kunststoffe* 1/1969.
5.104. Sewer pipe. *Plastics Industry News* 3/1987.
5.105. Siczek R., Subotowicz B., Rosochowicz J.: Linie do produkcji rur z PVC. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2/1987.
5.106. Sikora R.: „Techniki wytwarzania — Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych". PWN, Warszawa 1987.
5.107. Сикора Р., Влияние геометрических элементов многогнездной литевой формы на погреность размеров литевых изделий. *Пластические Массы* 7/1983.
5.108. Sikora R.: Wskaźniki energetyczne procesu wytłaczania z rozdmuchiwaniem folii PE-LD. *Polimery* 6/1987.
5.109. Sikora R.: Wytłaczanie — wytłaczarki. Zarys historyczny, stan aktualny, perspektywy. *Polimery* 8/1982.

5.110. Sikora R., Kloc J.: Tolerancje wymiarów wyprasek precyzyjnych. *Przegląd Mechaniczny* 15/1982.
5.111. Sikora R., Tomaszewski J.: Efektywność procesu wytłaczania polietylenu. *Polimery* 4/1982.
5.112. Sipowicz W.: Wpływ technologii na niektóre własności mechaniczne tłoczyw fenolowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1978.
5.113. Skonecki S.: Wpływ parametrów technologicznych wytłaczania z rozdmuchiwaniem folii PE-LD na zmiany właściwości eksploatacyjnych wywołane starzeniem. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, Lublin 1989.
5.114. Smorawiński A.: Organizacja wydziału wtryskowni. *Mechanik* 7–9/1979.
5.115. Smorawiński A.: Podstawy optymalizacji procesu wtrysku. *Mechanik* 5 i 7/1982.
5.116. Smorawiński A.: „Technologia wtrysku". WNT, Warszawa 1989.
5.117. Stasiek J.: Optymalizacja jednoślimakowych układów uplastyczniających. *Polimery* 7–8/1988.
5.118. Stasiek J.: Wytłaczarki dwuślimakowe oraz porównanie ich z wytłaczarkami jednoślimakowymi. *Polimery* 10–11/1976.
5.119. Stęga T.: Wtryskowe tłoczywa fenolowe. *Mechanik* 9/1978.
5.120. Stiner R.: Präzisionsspritzigiessen von technischen Klein-und Kleinstteilen. *Kunststoffe* 11/1975.
5.121. Stoeckhert K.: Spritzgiess-Blasformen. *Kunststoffe* 10/1973.
5.122. Stoeckhert K.: Streckblasen. *Kunststoffe* 7/1980.
5.123. Stranc W.: Orientacja włókien szklanych w wypraskach wtryskowych z tworzyw poliestrowych. „Technologie wtryskiwania i wytłaczania". Sekcja Tworzyw Sztucznych OW SIMP — Politechnika Częstochowska, Częstochowa 1988 oraz *Mechanik* 9–10/1990.
5.124. Surowiak W., Chudzyński S.: „Tworzywa sztuczne w budowie maszyn". WNT, Warszawa 1971.
5.125. Szczuka R.: Metody i urządzenia do dwustopniowego formowania tub z tworzyw sztucznych. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2/1987.
5.126. Szczuka R., Zduński L., Stasiek J.: Urządzenia do produkcji wyrobów z tworzyw sztucznych metodą wytłaczania z rozdmuchiwaniem. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna* 2/1987.
5.127. Tautz H.: Nomogramme zur Ermittlung der Stehzeit beim Formpressen von Duroplasten. „Beiträge zur Materialökonomie und Rationalisierung". VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1975.
5.128. „Техника переработки пластмасс" (praca zbiorowa pod red. Н.И. Басова i В. Броя). Изд. Химия, Москва 1985.
5.129. Thermoforming and furnishing. *Macplas International* 7/1988.
5.130. Tuleschkow N., Semerdijew S.: Über die Massgenauigkeit und das Schwindungsverhalten von Strukturschaumprüfkörpern. *Plaste und Kautschuk* 2/1978.
5.131. Udoskonalanie procesu szczelinowego wytłaczania folii. *Przegląd Mechaniczny* 12/1988.
5.132. Verarbeitungsmaschinen und — geräte. *Kunststoffe* 8/1981.
5.133. Wachsmann M.: Spritz — und Streckblasformen. *Kunststoffe* 9/1985.
5.134. Was leistet die Spritzgussmaschine. *Kunststoff-Berater* 5/1966.
5.135. Wirpsza Z., Brzeziński J.: „Aminoplasty". WNT, Warszawa 1970.
5.136. Własności pianki strukturalnej z polistyrenu produkcji ZChO. Opracowanie ZCh „Oświęcim".
5.137. Wolnicki Z.: Tuby z tworzywa i laminatu. *Opakowanie* 4/1985.
5.138. Zakrzewski L.: Prace nad granulacją tworzyw sztucznych w Instytucie Chemii Przemysłowej. *Polimery* 7/1974.
5.139. Zawistowski H., Frenkler D.: „Konstrukcja form wtryskowych do tworzyw termoplastycznych". WNT, Warszawa 1984.
5.140. Zawistowski H., Frenkler D.: Postęp w konstrukcji form i technologii wtrysku tworzyw sztucznych, zeszyt 3. ODK–SIMP, Warszawa 1975.
5.141. Zdyb M.W., Godlewska E.: Wpływ parametrów technologicznych wytłaczania z rozdmuchem cienkiej folii z PEmg na niektóre jej właściwości. *Polimery* 8 i 9/1976.
5.142. Zwierzychowski K.: Ustalenie tolerancji wymiarowych wyrobów z tworzyw sztucznych formowanych wtryskowo. „Nowoczesne technologie części maszyn z tworzyw sztucznych". SIMP, Katowice 1969.
5.143. Zwierzychowski K., Axentowicz M.: Problem tolerancji i pasowań wyrobów z tworzyw sztucznych w kraju i zagranicą. „Nowoczesne technologie części maszyn z tworzyw sztucznych". SIMP, Katowice 1969.

SKOROWIDZ

(opracowała Krystyna Jurkowska)

Aktywatory elektryczne 140
aktywowanie 137–142
– laserem 142
– płomieniem (opłomienianie) 141
– promieniami nadfioletowymi 142
– w procesie metalizowania 358
– warstwy wierzchniej 137
– wyładowaniami jarzeniowymi 142
– – niezupełnymi 137–140
anaforeza 319
analiza techniczno-ekonomiczna metod i odmian przetwórstwa 498
anizotropia skurczowa 371, 373
– – tworzyw poliestrowych 371
– – wyprasek 375
anomalie technologiczne, zapobieganie powstawaniu 386–390
– wyprasek, przyczyny powstawania 386, 388, 389
– – wtryskiwanych i prasowanych 386, 387
autoklaw, schemat 339

Bilans strumieni ciepła formy wtryskowej 208

Charakterystyka fizyczna układu dwuślimakowego 59–63
– procesu wytłaczania 149
– strefy dozowania 54
– – – w procesie wytłaczania 148, 149
– – zasilania 41
– wydajnościowa uplastyczniania 193
chlorosulfonowanie 362
chlorowanie 360, 361
–, warunki i rezultaty 361
ciąg produkcyjny 512
ciśnienie docisku 189
– dozowania 189
– prasowania 231, 412
– szczątkowe 190
– tworzywa na długości strefy dozowania 53
– wtryskiwania 187, 190
cykl procesu wtryskiwania 184
– – –, fazy 182
cylinder, funkcje i budowa 29–32
– układu uplastyczniającego wytłaczarek, schemat 29
czas minimalny przebywania tworzywa w układzie 406
– prasowania 414
cząstka kontrolna 86

Degradacja radiacyjna 137
docisk jako faza w procesie wtryskiwania 182
dokładność wytworów 369–390
dokumentacja konstrukcyjna 485
– technologiczna 486, 504–507
dozownik grawitacyjny wielogniazdowy 459
drukarka fleksograficzna 347
– obrotowa 345
drukowalność farby graficznej 343
drukowanie 341–349
– kombinowane 348, 349
– offsetowe 348
– płaskie 347, 348
–, podstawy procesu 341
– przez przenoszenie 348
– rotograwiurowe 346
– sitowe 344, 345
– wklęsłe 345, 346
– wypukłe 346, 347
– – fleksograficzne 346, 347
– – typograficzne 346
drukowność 344
dysza przędzalnicza 285
– wytłaczarska 146, 149, 157
– –, charakterystyka 148, 149

Efekt kalandrowania 267
ekonomiczność 504
ekspandowanie wstępne 115, 116
elektroforeza 319
elektrometalizowanie 351
elementy intensywnego mieszania 19, 20
– – ścinania 18, 19
energia jednostkowa w procesie aktywowania 138, 140

Falowanie wstęgi 425
farba graficzna, krzywa rozdziału 343
– –, model przenoszenia 343
farby graficzne 341, 342
– –, skład i właściwości 342
– –, wielkości charakteryzujące 342
fluidyzator elektrostatyczny 318, 319
– –, schemat 319
– –, – układu zasilania 484
–, schemat 313
fluktuacja temperatury tworzywa 82–84

fluktuacja temperatury tworzywa długookresowa 84
– – – krótkookresowa 82–84
fluorowanie 362
foliowanie 350
forma drukowa 341
– prasowalnicza 459
– przetłoczna do tworzyw utwardzalnych 236
– rozdmuchowa 435, 452, 454, 473
– tłoczna 232
– – do tworzyw utwardzalnych 233
– –, rodzaje zamknięcia 234
– wklęsłodrukowa 204
– wtryskowa klasyczna 205
– –, układ przepływowy 205
– wtryskowo-rozdmuchowa 452
formowanie polimeryzacyjne 301–312
– – PA 307–311
– – –, materiał wejściowy 308
– – PMMA 311, 312
– – PUR 301–307
– – –, materiał wejściowy 302
– PUR, proces technologiczny 479–482
– rozrostowe 114–118
– – polistyrenu 115–117
– – –, charakterystyka 397
– – PVC 117, 118
– –, warunki 398
–, wielkości charakterystyczne 309, 310
– wstępne powłoki z PVC 326, 327
formy z kanałami grzanymi 209
– – – zimnymi 209

Galwanizowanie 356
gaz fluidyzujący 314
gęstość pozorna wytłoczyny 164, 165
– sieciowania 363
głębokość kanału ślimaka 14, 23
głowica granulacyjna, schemat 441
– mieszająca, zasada działania 280
– przędzalnicza 287, 288
– współwytłaczarska 175
– wytłaczarska 146, 147, 149
– – do rur 157
– – kątowa (krzyżowa) 167, 168
– – liniowa 156
– – szczelinowa 425
gniazdo produkcyjne 512
gniotownik 273
granica płynięcia farby graficznej 342
grubość ścianek wyprasek 487
grupy tolerancji wyprasek 383, 385

Hartowanie 130
hermetyzacja odlewnicza 255, 256
– przetłoczna 236
– zanurzeniowa 326, 327

Indeks zmieszania 275
inicjatory sieciowania 362
instrukcja bhp 505
– kontroli technicznej 505
– montażu 506
– operacyjna 505, 506
– procesowa 505
jednostkowe zużycie energii w procesie wytłaczania 154, 156

Kalandrowanie 263–272
–, charakterystyka ogólna 263–267
– nakładające, stosowane materiały 469
–, proces technologiczny 467–470
kalandrowność 267–272
kalibrowanie ciśnieniowe 419
– kombinowane 422
– lamelowe 421
– próżniowe 420
–, rodzaje 420
– wewnętrzne 420, 421, 422
– wytłoczyny 418
– zewnętrzne 419, 420, 422
kanał śrubowy ślimaka 13
– wtryskowy centralny 204
– – doprowadzający 204
– –, przewężka 204
karta kalkulacyjna 505
– technologiczna 505
kataforeza 319
kąt kierunku ruchu 37
kit, definicja 329
kitowanie 329–339
– konstrukcyjne 329
–, podstawy procesu 329
kity, kryteria podziału 329, 330
kleistość farby graficznej 342
klej, definicja 329
kleje, kryteria podziału 329, 330
klejenie 329–339
– konstrukcji lotniczych 338
– opakowań 339
–, parametry determinujące 337
–, podstawy procesu 329
koszt jednostkowy 498, 500
– własny 498
koszty społeczne 504

krotność zwojów ślimaka 14, 23
krótkość farby graficznej 342
kryteria optymalizacji 394
kryterium masowe jakości wyprasek 202, 449
– strukturalne oceny jakości wyprasek 202
krzywa degradacji tworzywa 406
– ekonomiczności wytłaczania 403
– najwyższej temperatury dopuszczalnej tworzywa 403
– rozkładu tworzywa 406
– uplastycznienia tworzywa 406
kształtownik laminowany 244

Laminowanie 241–250
– natryskowe 242–245
– – sekwencyjne 461
– – specjalne 462
– – z nawijaniem 464
–, odmiany 242
– sekwencyjne 243, 244
– specjalne 242
lepkość plastyczna farby graficznej 342
liczba Fouriera 83
linia technologiczna 416
– – formowania polimeryzacyjnego PUR 479–482
– – laminowania natryskowego 462
– – – powierzchniowego 464
– – mieszania 471, 472
– – nanoszenia dwuwalcowego 484
– – – fluidyzacyjnego 483, 484
– – – z wytłaczaniem 485
– – nawijania śrubowo-krzyżowego i laminowania wzdłużnego rur 466
– – o strukturze szeregowej 502
– – pakowania 477
– –, podstawy wyboru 500–504
– – prasowania 461
– – przeciągania kształtowników 464
– – ulepszania radiacyjnego 478
– – wytłaczania 417, 418
– – – płyt płaskich 424, 425
– – – z granulowaniem 439, 440
– – – z rozdmuchiwaniem pionowo w górę 429
– – wytwarzania tub 456, 457
– – zgrzewania 476
linie technologiczne kalandrowania nakładającego 469, 470
– – – specjalnego 470
– – – tłoczącego 467–469
– – – zwykłego 469
luz 29

Masa wtrysku największa 193
maszyna drukarska 341
metalizowanie 349–360
– elektrochemiczne 356–360
– – ABS, operacje technologiczne 357, 358
– –, skład elektrolitów i warunki 356
– folią 350
– gazowe 351
– natryskowe bezpośrednie 350, 351
– – pośrednie 351
– próżniowe 352–356
– –, schemat urządzenia 353, 355, 356
– roztworowe 351
– wstępne 358
– zanurzeniowe 351
– zasadnicze 358
metody przetwórstwa fizyczno-chemicznego 301–365
– –, podstawy wyboru 494–500
miedziowanie 352
mieszanie 272–285
–, charakterystyka ogólna 273–275
– mechaniczne 273, 275–280
– mechaniczno-cieplne 273, 280–285
–, proces technologiczny 471
– rozprowadzające 85
– ścinające 85
– ślimakowe 283–285
mieszarka dwumieszadłowa Kenwooda 277
– – zetowa 276
– dwuśmigłowa 277
– ślimakowa kombinowana 279
– ślimakowo-stożkowa 278
mieszarki bębnowe 279
moc napędu ślimaka 54, 55
model Cassona 342
– – uogólniony 341

Nakładanie 249, 250
– kadłuba łodzi, schemat 250
nanoszarka dwuwalcowa 322, 323
– listwowa 322, 323
nanoszenie 312—329
– dwuwalcowe 323, 324
– elektrocieplne 316–320
– elektroforetyczne 319, 320
– –, charakterystyka 319
– elektrostatyczne 316–318
– –, schemat urządzenia 317
– fluidyzacyjne 313, 483, 484
– –, czynniki wpływające na proces 315
– fluidyzacyjno-elektrostatyczne 318, 319
– listwowe 323

nanoszenie natryskowe 324–325
– płomieniowe 320–322
– –, fazy procesu 321, 322
– –, schemat procesu 321
– –, – urządzenia 320
– polewające 322–324
–, proces technologiczny 483–485
– swobodne 322
– –, schemat 322
– wymuszone 322, 323
– –, schemat 323
– zanurzeniowe 326–329
napełnianie jako faza prasowania 230
natężenie objętościowe przepływu ciśnieniowego 49, 52, 53
– – – wleczonego 49
– przepływu 63–69
– – nominalne 55
nawijanie 242, 245–249
– planetarne 245–247
– –, schemat 246
–, podział 245
– śrubowe 247–249
– –, schemat 247, 248
– śrubowo-krzyżowe (oplatanie) 248, 249, 466
– –, schemat 249
niezawodność 503, 504
– układu 503, 504
niklowanie 352
normalizowanie 130
nośnik 238

Objętość obliczeniowa wtrysku 192
– skokowa wtrysku 192
odchyłki wymiarowe wyprasek 384
odlewanie 250–262
– bezciśnieniowe, schemat linii technologicznej 253
– bezpośrednie bezciśnieniowe, schemat 251
– ciśnieniowe, schemat stanowiska technologicznego 253
– normalne 251–257
– –, czynniki wpływające na właściwości odlewu 251
– pośrednie – kanałowe, schemat 252
– radiacyjne 255
– rotacyjne 257–259
– – kołowe 258
– – planetarne 257
okresy w procesie spieniania PUR 303
operacja 505
optymalizacja częściowa 395
– jedno-, dwu- i wielokryterialna 394
– pola wytłaczania 403
– procesów przetwórstwa 394
– – –, etapy 394, 395
– p–v–t 410, 411
organizacja linii i stanowisk 510–516
– – – –, podstawy 510–512
– przetwórstwa 369–507
organozol 313
otwieranie jako faza prasowania 230
– – – w procesie wtryskiwania 183
otwór wzdłużny ślimaka 15, 23

Pakowanie materiałów sypkich, schemat urządzenia 477
palniki elektryczne 109
– gazowe 109
parametry nanoszenia 315
pianki 302, 303
plastizol 313
plastyfikator (zmiękczacz) 11
plastyfikowanie 11
pochylenie ścianek wypraski 487
podgrzewanie 126–129
polewaczka 322
polioptymalizacja 394
połączenia kitowe, rodzaje obciążeń 331, 332
– klejowe, rodzaje obciążeń 330, 332
porowanie 112–118
–, warunki 395–398
powierzchnia bierna zwoju ślimaka 39
– czynna zwoju ślimaka 38
powlekarka przenośna, schemat 336
– stacjonarna, schemat 337
prasowanie 228–241
– niskociśnieniowe 239–241
– –, schemat 239
– – w podwyższonej temperaturze, schemat 241
– płytowe 238
– pneumatyczne normalne 240
– – –, schemat 240
– – próżniowe 239
– – próżniowo-ciśnieniowe 240
– – –, schemat 240
–, proces technologiczny 459–461
– przetłoczne 234–237
– –, schemat 234
– tłoczne, fazy 230, 231
– –, schemat 230
–, warunki 412–415
– wstępne 229, 230
– –, schemat 229

prasowanie wysokociśnieniowe 230–238
prasownia, ciąg produkcyjny 516
preimpregnacja mokra 245
– sucha 246
preimpregnaty (prepagi) 238
prepojemnik 435, 454
prędkośc obwodowa ślimaka 16
– przepływu ciśnieniowego 48
– – wleczonego 48
proces przetwórstwa 415
– –, wielkości optymalizowane 394
– przygotowawczy 415
– spieniania PUR, okresy 303
– technologiczny, schemat 416
– zakończeniowy 415
procesy przetwórstwa podstawowe 415
– – uzupełniające 415
– technologiczne PFC I i PCF 472–485
– – PFC II 416–472
– uzupełniające 415
projektowanie procesów technologicznych 485–507
– toku technologicznego 486
– – –, parametry do uwzględnienia 486
– wytworu 485
przeciągadło 244
przeciąganie 242–244
– kształtowników 463, 464
przedruk 348, 349
przemiana adiabatyczna 12
– autogeniczna 12
– autotermiczna 12
– politropowa 12
przepływ całkowity w kanale ślimaka 51
– międzyboczny 62
– międzyślimakowy 61
– międzywalcowy 62
– międzyzwojowy 61
– poprzeczny 51
– przeciekowy 62
– teoretyczny 63, 64
– tworzywa w układzie dwuślimakowym, rodzaje 62
przerwa jako faza prasowania 230, 231
– – – wtryskiwania 183
przetwórstwo fizyczno-chemiczne I rodzaju, metody 99–142
– – II rodzaju, metody 146–292
przędzarka, schemat 286
– stopowa 285
przędzenie 285–292
–, schemat 290
– z domieszkowaniem, schemat 291
przędzenie ze stopu, schemat 286
pulsacja ciśnienia i natężenia przepływu 84, 85
punkt pracy wytłaczarki 149
PVC ulepszony radiacyjnie, właściwości 136, 137

Rakiel 344
rama załadowcza 459
rdzeń 245
rozdzielanie cieplne (termoelektryczne) 118, 119
– folii 121–123
– tworzyw porowatych 119–120
redukcja objętości kanału ślimaka 14, 23
rozrastanie wstępne 115

Sieciowanie 362, 363
sitodruk 344, 345
skok linii śrubowej zwoju ślimaka 14, 23
skurcz całkowity 369
– liniowy 370, 372, 373
– pierwotny 369–375
– przetwórczy 369–376
– – tworzyw litych 370
– – – poliestrowych 371
– – – porowatych 369, 370
– wtórny 369, 370, 374, 375
– wtryskowy 370, 372
spajalność tworzyw 395, 396
spajanie 99–112
–, warunki 395–398
spawanie 108–112
– ręczne 111
–, rodzaje połączeń 108
–, – spoin 109
–, warunki 397
spawarka bezpalnikowa – wytłaczarkowa 11, 112
– z palnikiem 111
spiekanie 112–114
–, charakterystyka procesu 113
spienianie PA, forma 311
sprasowanie jako faza prasowania 230
srebrzenie 351
stanowisko technologiczne 416
– – laminowania natryskowego i nawijania rur 465
– – nawijania śrubowego zbiorników 465
– –, podstawy wyboru 500–504
– – prasowania 460, 461
– – wtryskiwania 444, 446
– – wytłaczania z rozdmuchiwaniem od dołu 434

stapiacz 285
– rusztowy 285
stopień automatyzacji 503
– rozciągania folii w kierunku poprzecznym 430, 431
– – – – – wzdłużnym 430
– zmieszania 274, 284
stosunek L/D dla ślimaka 14, 15, 23
strefa dozowania 14, 46–55
– –, charakterystyka 54
– przemiany 14, 43–46
– zasilania 13, 36–42
– –, charakterystyka 41
—, rozkład ciśnienia 39, 40
– zasypu 13, 32–35
stromość linii śrubowej zwoju ślimaka 14, 23
strumień objętości przepływu 55
styropian 115
sulfonowanie 361, 362
suszarka śrubowo-pneumatyczna, schemat 125
– turbinowo-półkowa, schemat 124
suszenie 123–125
– tworzyw, charakterystyka 398
–, warunki 395–398
szczelina międzywalcowa 66
szerokość grzbietu zwoju ślimaka 14, 23
sztywność wyprasek 487
szybkość aktywowania 138

Ślimaki klasyczne 14, 16, 24
– –, elementy geometryczne 14
– niekonwencjonalne 16–18, 25
– specjalne 18–21
– stożkowe, elementy geometryczne 23
– walcowe, elementy geometryczne 23
– w układach trój- i więcej ślimakowych 25–29
– w układzie dwuślimakowym 21–25
– – – jednoślimakowym 13–21
– – – kaskadowym 26–28
– – – planetarno-kaskadowym 28
– – – planetarnym 28
– – – ulastyczniania 13–32

Tabletkarka 230
tabletkowanie 229, 230
technika RIM 303–305
– –, prasa hydrauliczna 305
– –, schemat 304
– –, siła zamknięcia formy 304
– RI-RIM 305, 307
– –, schemat 307
– RRIM 304, 305
— SRIM 305, 306
– –, przykładowe wytwory 306
technologia drukowania 344
– klejenia i kitowania 336–339
– przetwórstwa 369–507
technologiczność konstrukcji 486
– – wytworu 486–494
temperatura prasowania 232
tłoczywa DMC 463
– SMC 463
– TMC 463
tolerancja konstrukcyjna wypraski 377
– technologiczna wypraski 376, 377
– użytkowa wypraski 378
– wymiaru gniazda 376, 377
tolerancje wymiarowe wyprasek 384
– wymiaru 376–382
trawienie w procesie metalizowania 357
trwałość maszyn i urządzeń 503
tunele grzejne 128

Uczulenie w procesie metalizowania 357
ugniatanie 273, 282, 283
ugniatarka typu Banbury, schemat 283
ujednorodnienie cieplne tworzywa 85
układ dwuślimakowy, charakterystyka fizyczna 59–63
– –, zarys teorii 58–69
– jednoślimakowy, zarys teorii 35–58
– kaskadowy ślimaków 26–28
– narzędziowy wtryskarki dźwigniowo-hydrauliczny 209
– planetarny ślimaków 28
– ślimakowo-planetarny liniowy 28
– tolerancji i odchyłek 382–385
– uplastyczniający bezślimakowy 12
– – drganiowy 72, 73
– –, funkcje 11
– – mieszany 12
– –, przekrój poprzeczny 179
– – ślimakowy 12
– – –, schemat 13
– – teledynamiczny 13
– – z dwoma współosiowymi tłokami 71, 73
układy uplastyczniające dwuślimakowe, podział 21, 22
– –, podział 12
ulepszanie chemiczne 360–365
– cieplne 129–134
– – cykliczne 131
– –, hartowanie 130
– – mieszane 131
– –, normalizowanie 130

ulepszanie chemiczne, odmiany 130, 131
– –, wygrzewanie 130
– cieplno-ciśnieniowe 131
– fizyczne 129–141
– radiacyjne 134–137
– –, proces technologiczny 478, 479
uplastycznianie beślimakowe 69–79
– jako faza w procesie wtryskiwania 183
– liniowe 77
–, metody 11, 12
– mieszane 79–82
–, ocena efektywności 82–87
– pierścieniowe 75, 76
– planetarne 77–79
–, podstawy procesu 11–95
– ślimakowe 12
– ślimakowo-planetarne 78
– ślimakowo-tarczowe 80–82
– ślimakowo-tłokowe 79, 80
– tarczowe 74
– tłokowe 12, 69–74
– – klasyczne 69–71
– wirnikowe 76
– za pomocą układu pompowego 12
urządzenie chłodzące 422
– odbierające 422
– – gąsienicowe 423
– – kołowe 423
– – taśmowe 423, 424
uszczelnianie zanurzeniowe 328

Walcarka 273
walcowanie 23, 280–282
– za pomocą dwu walców, schemat 282
walec tłoczący (moletujący) 467
warunki przetwórstwa 392–415
– –, podstawy doboru 393–395
– –, podział 392, 393
wskaźnik efektywności techniczno-ekonomicznej 499
– Schenkla 402
– skurczu 383
wskaźniki oceny efektywności uplastyczniania bezpośrednie 82
– – – – pośrednie 82–87
współczynnik bezpieczeństwa 336
– de Bruyna 335
– efektywności ulepszania K_u 130
– – wtryskiwania 445, 446
– sprasowania tłoczyw 228
– wyciągu 290
– względnej zdolności uplastyczniania 192
współwtryskiwanie 223
współwtryskiwanie dwóch tworzyw, schemat 222
współwytłaczanie 169–176
–, możliwości łączenia tworzyw 176
wtrysk 182
– reaktywny 301
wtryskarka, schemat 183
wtryskarki, podział 186
– pojedyncze, podział 187
– zespolone, podział 187
wtryskiwanie 182–228
– dokładnościowe 193–203
– dwukolorowe, schemat 218
– dwutworzywowe dwupunktowe, schemat 221
– – zaworowe, schemat 220
– elastomerów utwardzalnych 214–216
– konwencjonalne 182–193
– otwarte – wielokolorowe 216–218
– porujące 223–226
– – niskociśnieniowe 223–225
– – wysokociśnieniowe 225, 226
–, schemat procesu 184
– trójkolorowe, schemat 219
– trójtworzywowe, schemat 222
– tworzyw utwardzalnych 211–214
– – –, schemat procesu 213
–, układ narzędziowy 204–210
–, wartości temperatury i ciśnienia 407
–, warunki 405–412
– wieloskładnikowe 216–223
– wyprasek 444–451
– wysokotemperaturowe 227, 228
– –, charakterystyka 228
– z napełnianiem 455
– z rozdmuchiwaniem 451–455
– – –, proces bezpośredni 452–454
– – –, – sekwencyjny 454, 455
– z wytłaczaniem 456–458
– zamknięte wielotworzywowe 218–223
wtryskownia, schemat 513
wydajnośc linii technologicznej 418, 419
– masowa przepływu 55
– objętościowa przepływu 55
– – strefy zasilania 38
– rzeczywista 502
– teoretyczna 502
– uplastyczniania 191
– – nominalna 191
wygrzewanie 130
wykres Gilmore'a – Spencera 190
– $p-v-t$ w procesie wtryskiwania 207
wylewanie 259, 260

wymiar konstrukcyjny 377
– nominalny 376
– technologiczny 376
– użytkowy wypraski 377, 378
wymieszanie tworzywa 85
wypełnianie gniazda formy wtryskowej proste 206
– – – – strumieniowe 205, 206
wypraska wtryskowa 182
wypraski normalne 378
–, podział na klasy 378
– precyzyjne 378
– przetłoczne 236
–, przykłady rozwiązań konstrukcyjnych 488
– techniczne 378
–, ukształtowanie żeber i naroży 490
–, właściwości higroskopijne 380
– z zapraskami metalowymi 495
wytłaczanie 146–182
– autotermiczne 159–161
–, charakterystyka 404
–, – procesu 149
–, – strefy dozowania 148, 149
– dwuślimakowe 176–182
– – PVC, rozkład temperatury 399
– folii płaskiej 426
– –, warunki 400
– konwencjonalne 146–158
– kształtowników, płyt i folii 417–427
– płyt, warunki 400
– porujące 164–166
– powlekające 166–169
– – ciśnieniowe 167
– – próżniowe 166
– – taśm 169
– rur, warunki 400
– tłokowe 161–163
–, warunki 398–405
– z granulowaniem 438–442
– z napełnianiem 438
– z rozdmuchiwaniem pionowo w górę 429
– – – swobodnym 427–431
– – – w formie 432–438
– – – – –, odmiany 433
– – – – –, proces dwuetapowy 435–438
– – – – –, – –, wielkości charakterystyczne 436
– – – – – ,– jednoetapowy 432
– z wulkanizowaniem 442–451
wytłaczarka autotermiczna, zasada budowy 160
– dwuślimakowa, schemat przekładni rozdzielczej 180
– – stożkowa, zalety 181
– – walcowa 177
– – –, schemat kinematyczny przekładni 180
– – –, – przekładni napędowej 181
– jednoślimakowa 147
– tłokowa, schemat 162
–, układ napędowy, wymagania 148
wytłoczywa 146
wzornik sitowy 344

Zabieg 505
zalewanie 260–262
zależność $p-v-t$ dla polietylenu 91
zamszowanie 340, 341
– ciągłe wstęg 341
– elektrostatyczne 340
– –, zasada działania urządzenia 340
zamykanie formy wtryskowej 182
– jako faza prasowania 230
zapraska 495
zasięg użyteczny elektronów 135
zasobnik 32–35
–, elementy geometryczne 33
– walcowo-stożkowy, schemat 33
zdolność do drukowania 344
zestaw przędzalniczy 286
zgrzewanie 99–108
– bezpośrednie 106
– drganiowe 104
– impulsowe 100
– indukcyjne 107
–, odmiany 99
– pojemnościowe 104
– pośrednie 106
–, proces technologiczny 473–478
–, schemat przebiegu procesu technologicznego 476
– tarciowe 102
– ultradźwiękowe 105
–, warunki 395, 396
– za pomocą nagrzanego drutu lub taśmy 100
– – – – klina 101
– – – nagrzanej listwy 100
– – – – płyty 101
złoże fluidalne 314

Żelowanie plastizolu PVC 326, 327

ZAKŁADY CHEMICZNE „ORGANIKA-SARZYNA"
37-310 NOWA SARZYNA, tel. Rzeszów 386-21
tlx 0632302;03;07; fax 628-624

DOŚWIADCZONY PRODUCENT
PRZYJAZNY PARTNER HANDLOWY
NIEZAWODNY DORADCA TECHNICZNY

Produkcja dla wielu segmentów rynku tworzyw sztucznych

Żywice
EPIDIAN®

★ Epoksydowe żywice podstawowe i modyfikowane
★ Utwardzacze żywic epoksydowych

Żywice
POLIMAL®

★ Poliestrowe żywice nienasycone
— konstrukcyjne i specjalne
★ Układy utwardzające

FENOPLASTY

★ Żywice fenolowo-formaldehydowe
★ Odmiany ukierunkowane na osiągnięcie określonych parametrów użytkowych

WYROBY SILIKONOWE

★ Oleje, pasty, emulsje, żywice
★ Kauczukowe uszczelniacze w wygodnych opakowaniach dozujących

Doskonałe zaplecze badawczo-wdrożeniowe

Stałe rozszerzanie asortymentu wyrobów jako wynik szybkiej reakcji na potrzeby rynkowe
Uwypuklanie lub nadawanie specyficznych cech przetwórczych lub użytkowych

DOTRZYMUJEMY KROKU ŚWIATOWYM LIDEROM

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ
W 75581
000-0/5582-00-0

ISBN 83-85722-45-9

BIBLIOTEKA GŁÓWNA
POLITECHNIKI POZNAŃSKIEJ
W 75581
000-075582-00-0

ISBN 83-85722-45-9