

m

Praca zbiorowa pod redakcją
Krzysztofa Wilczyńskiego

Przetwórstwo tworzyw sztucznych



OFICyna WYDAWNICZA
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ
WARSZAWA 2000

SPIS TREŚCI

Przedmowa	4
1. Podstawy przetwórstwa tworzyw sztucznych (<i>Bogusław Misterek</i>)	5
2. Metody przygotowania tworzyw do przetwórstwa (<i>Bogusław Misterek</i>)	12
3. Metody przetwórstwa tworzyw	22
3.1. Wytłaczanie (<i>Krzysztof Wilczyński</i>)	22
3.2. Wytłaczanie z rozdmuchiwaniem (<i>Krzysztof Wilczyński</i>)	48
3.3. Wtryskiwanie (<i>Henryk Zawistowski</i>)	53
3.4. Prasowanie (<i>Jacek Garbarski</i>)	117
3.5. Walcowanie i kalandrowanie (<i>Andrzej Kaczyński</i>)	135
3.6. Spienianie (<i>Jan Borkowski</i>)	147
3.7. Formowanie bezciśnieniowe (<i>Jan Borkowski</i>)	152
3.8. Przetwórstwo tworzyw wzmocnionych (<i>Jan Borkowski</i>)	158
4. Metody wtórnego przetwórstwa tworzyw	167
4.1. Termoformowanie (<i>Andrzej Kaczyński</i>)	167
4.2. Łączenie tworzyw (<i>Szymon Zięba</i>)	176
4.3. Obróbka skrawaniem (<i>Szymon Zięba</i>)	197
4.4. Obróbka plastyczna (<i>Szymon Zięba</i>)	220
4.5. Obróbka powierzchniowa (<i>Jan Borkowski</i>)	256
4.6. Wtórne zagospodarowanie tworzyw (recyrkulacja) (<i>Jacek Garbarski</i>)	263
Bibliografia	277

Opiniodawca
Jerzy Bursa

Zespół autorski

Jan Borkowski, Jacek Garbarski, Andrzej Kaczyński, Bogusław Misterek,
Krzysztof Wilczyński, Henryk Zawistowski, Szymon Zięba

Opracowanie redakcyjne
Barbara Punda

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2000

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

ISBN 83-7207-154-3

Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ul. Polna 50, 00-644 Warszawa, tel. 825-75-18
Wydanie I. Arkuszy drukarskich 17,50. Druk ukończono w maju 2000 r. Zam. nr 350/98
Drukarnia Oficyny Wydawniczej PW, ul. Kosińska 12/16, 02-321 Warszawa, tel. 660-40-26

SPIS TREŚCI

Przedmowa	4
1. Podstawy przetwórstwa tworzyw sztucznych (<i>Bogusław Misterek</i>)	5
2. Metody przygotowania tworzyw do przetwórstwa (<i>Bogusław Misterek</i>)	12
3. Metody przetwórstwa tworzyw	22
3.1. Wytłaczanie (<i>Krzysztof Wilczyński</i>)	22
3.2. Wytłaczanie z rodmuchiowaniem (<i>Krzysztof Wilczyński</i>)	48
3.3. Wtryskiwanie (<i>Henryk Zawistowski</i>)	53
3.4. Prasowanie (<i>Jacek Garbarski</i>)	117
3.5. Walcowanie i kalandrowanie (<i>Andrzej Kaczyński</i>)	135
3.6. Spienianie (<i>Jan Borkowski</i>)	147
3.7. Formowanie bezciśnieniowe (<i>Jan Borkowski</i>)	152
3.8. Przetwórstwo tworzyw wzmocnionych (<i>Jan Borkowski</i>)	158
4. Metody wtórnego przetwórstwa tworzyw	167
4.1. Termoformowanie (<i>Andrzej Kaczyński</i>)	167
4.2. Łączenie tworzyw (<i>Szymon Zięba</i>)	176
4.3. Obróbka skrawaniem (<i>Szymon Zięba</i>)	197
4.4. Obróbka plastyczna (<i>Szymon Zięba</i>)	220
4.5. Obróbka powierzchniowa (<i>Jan Borkowski</i>)	256
4.6. Wtórne zagospodarowanie tworzyw (recykulacja) (<i>Jacek Garbarski</i>)	263
Bibliografia	277

PRZEDMOWA

Skrypt jest przeznaczony dla studentów Wydziału Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej; stanowi podstawę wykładu z „przetwórstwa tworzyw sztucznych”. Jest zalecany także studentom innych wydziałów Politechniki Warszawskiej, np. Chemii, Inżynierii Materiałowej, oraz innych uczelni technicznych. Przedstawia zasadnicze zagadnienia przetwórstwa tworzyw: materiałowe i technologiczne. Dotyczy głównych technologii przetwórstwa tworzyw. W rozdziale pierwszym – wprowadzającym – omówiono podstawy materiałowe, dotyczące struktury i klasyfikacji tworzyw, podstawowe własności przetwórcze itp.; w rozdziale drugim – zagadnienia przygotowania tworzyw do przetwórstwa; w rozdziale trzecim – podstawowe technologie przetwórstwa tworzyw, np. wytłaczania i wtryskiwania; w rozdziale czwartym – zagadnienia wtórnego przetwórstwa tworzyw.

1. PODSTAWY PRZETWÓRSTWA TWORZYW SZTUCZNYCH

POLIMERY

Tworzywa sztuczne są materiałami użytkowymi, których podstawowym (często jedynym) składnikiem są *polimery* – chemiczne związki organiczne o bardzo dużej masie cząsteczkowej – od 10^4 do 10^7 . Bardzo duże cząsteczki polimerów składają się z powtarzalnych segmentów – *merów* o różnej budowie chemicznej, wynikającej ze struktury chemicznej *monomerów* – małych cząsteczkowych surowców do produkcji polimerów. Nazwę polimeru tworzy się przez dodanie do nazwy odpowiedniego monomerycznego surowca przedrostka „poli-” (np. etylen – polietylen). Monomery zamienia się w polimery w wyniku różnego typu reakcji chemicznych:

- *polimeryzacji*, w czasie której cząsteczki monomeru łączą się w dużą cząsteczkę polimeru zachowując nie zmieniony układ atomów w merach, bez wydzielania produktów ubocznych;
- *polikondensacji*, w czasie której cząsteczki monomeru łącząc się w dużą cząsteczkę polimeru wydzielają jako produkt uboczny cząsteczki substancji małej cząsteczkowej (zazwyczaj wody);
- *poliaddycji*, w czasie której cząsteczki monomeru łączą się ze sobą w dużą cząsteczkę polimeru dzięki przestawieniu atomów w merach, bez wydzielania produktów ubocznych.

Reakcje te mogą być prowadzone w procesach chemicznych produkcji tworzyw sztucznych, przebiegać w procesach formowania wyrobu, a także występować dwuetapowo – częściowo podczas produkcji tworzywa i częściowo podczas jego formowania.

Jeżeli w polimerze są zawarte mery jednego rodzaju, nazywamy go *homopolimerem*, jeżeli dwóch lub więcej – *kopolimerem*. Kopolimery produkujemy z odpowiedniej ilości monomerów (*komonomerów*), aby otrzymać materiał o takim zestawie właściwości, jakich nie oferuje żaden z typowych homopolimerów.

Polimery z monomerów dwufunkcyjnych (zaliczamy do nich także związki chemiczne z jednym podwójnym wiązaniem w cząsteczce) mają budowę liniową – nazywamy je polimerami termoplastycznymi (*termoplastami*), gdyż w zależności od zmian temperatury mogą zmieniać stan skupienia, przechodząc od ciała stałego do cieczy przez ogrzewanie i odwrotnie – przez chłodzenie, przy czym przemiany te mają charakter odwracalny, tj. mogą następować wielokrotnie.

Polimery zbudowane z monomerów o liczbie grup funkcyjnych w cząsteczce > 2 (lub o liczbie podwójnych wiązań w cząsteczce > 1) mogą tworzyć strukturę usieciowaną przestrzennie. Przez usieciowanie przestrzenne tracą one możliwość przechodzenia w stan ciekły i występują tylko jako ciała stałe; są nazywane polimerami utwardzalnymi (*duroplastami*).

Podstawowe cechy polimerów

Właściwości polimerów zależą od ich budowy chemicznej. Najważniejszym parametrem określającym budowę cząsteczki polimeru jest masa cząsteczkowa. W otrzymanym technicznie polimerze (przy ogromnej liczbie cząsteczek) wielkość poszczególnych cząsteczek nie jest jednakowa (co określamy jako *polydispersję*), lecz podlega prawom statystyki. W celu opisanie wielkości cząsteczek polimeru posługujemy się *średnią masą cząsteczkową* – $\bar{M}$. Im większa jest $\bar{M}$, tym większe są oddziaływania między cząsteczkami; dlatego ze wzrostem $\bar{M}$ polepszają się właściwości użytkowe polimeru, ale pogarszają się możliwości formowania.

Na właściwości polimeru ogromny wpływ ma rodzaj i liczba atomów poszczególnych pierwiastków oraz ich wzajemne położenie w cząsteczce. Syntetyczna informacja o tym jest zawarta na ogół w nazwie polimeru – zawiera ona zwykle jednoznaczne określenie wzoru chemicznego meru cząsteczki. Jeżeli mer ma budowę symetryczną (np. $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ w polietylenie), w cząsteczce ładunki elektryczne są rozłożone symetrycznie, dzięki czemu jest ona elektrycznie obojętna i oddziałuje na cząsteczki sąsiednie tylko siłami dyspersyjnymi. W przypadku jednak niesymetrycznej budowy chemicznej może nastąpić zdysproporcjonowanie ładunków elektrycznych w merach; powstają w nich wtedy mikrodipole, które działając na dipole cząsteczek sąsiednich zwiększają oddziaływanie międzycząsteczkowe, dzięki czemu polepszają się właściwości użytkowe polimeru.

Na właściwości użytkowe polimeru duży wpływ ma także ułożenie jego cząsteczek w przestrzeni. Jeżeli budowa chemiczna merów jest prosta i są one połączone z sobą w sposób powtarzalny, cząsteczka polimeru ma regularną budowę. Cząsteczki (lub ich segmenty) mogą się ułożyć blisko siebie tworząc struktury nadcząsteczkowe przypominające regularnością ułożenia w przestrzeni kryształy (nazywane są *krystalitami*). Polimery tego typu nazywamy *częściowo krystalicznymi* (obszary uporządkowane nigdy nie obejmują 100% masy polimeru). Jeżeli struktura chemiczna meru jest rozbudowana i (lub) mery nie są połączone z sobą w sposób powtarzalny, sąsiednie cząsteczki polimeru nie mogą ułożyć się blisko siebie w sposób regularnie uporządkowany. Cząsteczki są w tym przypadku ułożone w sposób chaotyczny, bardziej od siebie oddalone – tego rodzaju polimery nazywamy *amorficznymi* (*bezipostaciowymi*). Siły oddziaływań międzycząsteczkowych są tym większe, im

mniejsza jest odległość między cząsteczkami; dlatego polimery amorficzne mają gorsze właściwości użytkowe niż polimery częściowo krystaliczne. Zarówno jedno, jak i drugie znajdują zastosowanie praktyczne.

Polimery, tak jak wszystkie substancje organiczne, mają ograniczoną wytrzymałość cieplną; przy nadmiernym wzroście temperatury ulegają rozkładowi chemicznemu, tracąc swoje właściwości użytkowe i wydzielając lotne produkty rozkładu o charakterystycznym dla każdego polimeru składzie.

TWORZYWA SZTUCZNE

Przy różnorodności zastosowań czyste homo- lub kopolimery nie zawsze mogą swymi właściwościami zaspokoić wymagania użytkowników. Aby jak najlepiej dopasować materiał do warunków użytkowania, do polimerów dodaje się różnego rodzaju *środki pomocnicze* (tabl. 1.1). Mieszaninę polimeru (czystej substancji chemicznej) ze środkami pomocniczymi nazywamy tworzywem sztucznym^{*)}. Biorąc pod uwagę dużą paletę dostępnych polimerów i środków pomocniczych oraz rozmaitość proporcji ich używania w poszczególnych przypadkach, można wyobrazić sobie nieograniczenie dużą ilość tworzyw sztucznych, dopasowanych swymi właściwościami do jak najlepszego spełniania funkcji użytkowych w poszczególnych zastosowaniach. Ta wszechstronność stosowalności tworzyw sztucznych jest jedną z przyczyn powszechności i masowości ich używania w różnych dziedzinach gospodarki narodowej.

W skali światowej produkcja tworzyw sztucznych już w latach osiemnastych przekroczyła objętościowo produkcję wszystkich metali, a obecnie osiąga ponad 150 mln t/rok. Ponad 90% stanowią tanie (< 2 USD/kg) *tworzywa powszechnego użytku* o przeciętnych właściwościach użytkowych obejmujące cztery grupy tworzyw: polietylenowe, polipropylenowe, polichlorowinylo- we i polistyrenowe. Kilka procent tonażu produkowanych tworzyw to *tworzywa konstrukcyjne* charakteryzujące się lepszymi właściwościami mechanicznymi i cieplnymi; dzięki temu są stosowane w sytuacjach, w których materiał jest długotrwale poddawany naprężeniom mechanicznym, także w podwyższonej temperaturze. Tworzywa te są jednak droższe, kosztują kilka do kilkunastu USD/kg. Wreszcie *tworzywa Hi-Chem*, charakteryzujące się najlepszymi właściwościami mechanicznymi, chemicznymi i cieplnymi, kosztujące nawet do 100 USD/kg. Wysoka cena ogranicza ich udział w ogólnej produkcji tworzyw do ok. 1%.

^{*)} Na ogół tworzywo sztuczne określamy nazwą polimeru, który stanowi najważniejszą część jego składu.

Przy doborze rodzaju tworzywa do określonego zastosowania kierujemy się zarówno jego właściwościami, jak i ceną. Obowiązuje tu zasada „tak dobre, jak to konieczne, ale nie lepsze, niż to niezbędnie potrzebne”, gdyż lepsza jakość jest zawsze związana z wyższą ceną tworzywa.

Tablica 1.1

Typowe środki pomocnicze do tworzyw sztucznych

Rodzaj	Udział w tworzywie	Cel stosowania
Polimery modyfikujące	do kilkudziesięciu %	modyfikacja właściwości mechanicznych, cieplnych itp.
Zmiękczacze	do kilkudziesięciu %	zwiększenie odkształcalności, zmniejszenie sztywności (kosztem zmniejszenia wytrzymałości)
Napełniacze	do kilkudziesięciu %	obniżenie ceny tworzywa (kosztem pogorszenia właściwości mechanicznych)
Napełniacze wzmacniające	do kilkudziesięciu %	polepszenie właściwości mechanicznych
Stabilizatory cieplne	do kilku %	ochrona przed rozkładem termicznym w czasie przetwarzania i w czasie eksploatacji w podwyższonej temperaturze
Antyutleniacze	rzędu 1%	ochrona przed działaniem tlenu z powietrza podczas przetwarzania i w czasie eksploatacji wyrobu
Absorbery nadfioletu	ułamek %	zwiększenie odporności wyrobu na destrukcję spowodowaną światłem słonecznym i dziennym
Barwniki	do setnych części %	nadanie żądanej barwy
Pigmenty	od setnych części % do kilku %	nadanie żądanej barwy, zmniejszenie przepuszczalności światła
Środki antystatyczne	ułamek %	zmniejszenie właściwego oporu powierzchniowego
Antypireny	do kilkunastu %	zmniejszenie palności
Środki smarujące	do 1%	ułatwienie przetwarzania
Środki poślizgowe	do kilku %	zmniejszenie współczynnika tarcia
Środki antypoślizgowe	do kilku %	zwiększenie współczynnika tarcia
Środki spieniające	do kilku %	nadanie wyrobowi struktury spienionej
Nukleanty	poniżej 1%	zapewnienie rozdrobnionej struktury krystalitów (w tworzywach częściowo krystalicznych) lub rozdrobnionych komórek w tworzywach spienionych

Właściwości tworzyw sztucznych

Ogólną cechą wszystkich tworzyw sztucznych jest mała gęstość, zbliżona do 1, a więc znacznie mniejsza niż metali. Właściwości chemiczne (palność, odporność na czynniki wywołujące korozję, rozpuszczalniki i inne związki chemiczne, pochłanianie wilgoci, przepuszczalność dyfuzyjna gazów i cieczy itp.) zależą od chemicznej budowy polimeru i ewentualnych środków pomocniczych. Także właściwości mechaniczne poszczególnych tworzyw sztucznych mogą być bardzo zróżnicowane – od miękkich, podatnych na odkształcenia, do sztywnych, porównywalnych z metalami; materiały te obejmują całe spektrum możliwości. Ogólną niekorzystną cechą tworzyw jest podatność na *pełzanie*, tj. postępujące w czasie odkształcanie materiału poddanego stałemu naprężeniu, a także występowanie zmęczenia materiału w warunkach działania stałego naprężenia. Właściwości mechaniczne są w dużym stopniu zależne od temperatury. Właściwości cieplne tworzyw wynikają z ich natury chemicznej – są podobne do właściwości związków organicznych. Tworzywa charakteryzują się znacznie większym od metali współczynnikiem rozszerzalności (co powoduje duże zmiany objętości przy zmianach temperatury, szczególnie w przypadku tworzyw częściowo krystalicznych – podczas przemiany fazowej) i bardzo małą przewodnością cieplną. Mają dobre lub bardzo dobre własności dielektryczne – są powszechnie stosowane na izolacje w układach elektrycznych. Amorficzne tworzywa mogą być przezroczyste, tworzywa częściowo krystaliczne mogą być najwyżej przeświecające. Niestety tworzywa sztuczne na ogół nie są całkowicie odporne na działanie promieniowania nadfioletowego – pod jego wpływem ulegają stopniowo postępującemu rozkładowi i tracą właściwości użytkowe. W stosowaniu tworzyw sztucznych trzeba liczyć się z występowaniem *korozji naprężeniowej* – jest to pękanie i rozpadanie się wyrobu w warunkach jednoczesnego działania na wyrób naprężeń mechanicznych i zewnętrznych oddziaływań substancji chemicznych nawet wtedy, gdy pojedyncze, oddzielne działanie tych czynników na wyrób nie wywołuje w nim żadnych zmian. Do szkodliwych środków chemicznych należą w przypadku tworzyw nawet tak pozornie łagodne, jak roztwory mydeł i detergentów.

Przetwórstwo tworzyw sztucznych

Przetwórstwo tworzyw sztucznych obejmuje wszystkie działania i zjawiska, dzięki którym polimer zamienia się w gotowy wyrób. Najważniejsza jest faza nadawania materiałowi kształtu gotowego wyrobu. Tworzywa sztuczne charakteryzują się tym, że w odpowiednich warunkach można im nadać w krótkim czasie i przy małym zużyciu energii dowolną postać, dzięki czemu w produkcji masowej przedmiotów o skomplikowanych kształtach można znacznie obniżyć koszty wyrobów w porównaniu z takimi samymi wyrobami z innych

materiałów (jest to druga przyczyna bardzo szybkiego rozwoju stosowania tworzyw sztucznych na skalę masową).

Nadanie tworzywu postaci gotowego wyrobu polega najczęściej na odkształceniu go w stanie płynnym, tj. na wykorzystaniu procesu płynięcia, a następnie zestaleniu materiału przez ochłodzenie (tworzywa termoplastyczne) lub sieciowanie (tworzywa duroplastyczne). O efektach procesu płynięcia decyduje lepkość ciekłego tworzywa; z powodu znacznej masy cząsteczkowej polimerów jest ona bardzo duża (tak, że siła ciężkości nie umożliwia odkształcenia tworzywa w stopniu technicznie użytecznym) i tym większa, im większa jest $\bar{M}$ polimeru. Lepkość tworzyw sztucznych (tak jak wszystkich cieczy) maleje ze wzrostem temperatury; aby stworzyć dogodne warunki formowania, ogrzewa się je na ogół do temperatury wyższej o kilkadziesiąt K od temperatury przejścia do stanu ciekłego. Podczas przechodzenia ze stanu stałego do ciekłego uwidaczniają się różnice między tworzywami częściowo krystalicznymi i amorficznymi; pierwsze topią się podczas ogrzewania w zakresie kilku K (na skutek zaniku krystalitów); drugie przechodzą ze stanu stałego w ciekły stopniowo, w zakresie kilkudziesięciu K, bez skokowej zmiany stanu skupienia.

Aby uzyskać efektywne odkształcanie stopionego tworzywa, stosuje się wymuszone dużym ciśnieniem (przekraczającym w niektórych procesach 100 MPa) intensywne jego płynięcie. Ujawnia się tutaj specyficzna dla stopionych tworzyw sztucznych charakterystyka płynięcia. O ile lepkość cieczy newtonowskich w warunkach izotermicznych jest stała, a efekty przepływu (natężenie) proporcjonalne do różnicy ciśnienia powodującej przepływ, to stopione polimery (klasyfikowane jako *ciecze pseudoplastyczne*) mają lepkość zmniejszającą się w miarę zwiększania intensywności przepływu, a natężenie przepływu rośnie szybciej, niż wywołująca je różnica ciśnień. Zależności te są przedstawiane przy pomocy różnych wzorów. Przypomnijmy, że

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

gdzie: η – lepkość, τ – naprężenie styczne, $\dot{\gamma}$ – prędkość ścinania.

Charakterystyki cieczy newtonowskich (*krzywe płynięcia*) można przedstawić na wykresie $\tau = f(\dot{\gamma})$ jako linie proste przechodzące przez początek układu; tangens kąta nachylenia jest miarą lepkości. Na tym samym wykresie linie charakteryzujące ciecze pseudoplastyczne zaczynają się w początku układu odcinkami prostych (o bardzo dużym kącie nachylenia), które jednak szybko zakrzywiają się, dając krzywe spłaszczone. Spośród wzorów opisujących te krzywe najczęściej jest stosowane *prawo potęgowe*:

$$\tau^m = k \dot{\gamma} \quad (\text{lub } \tau = k' \dot{\gamma}^n)$$

gdzie $m = n^{-1} > 1$ (najczęściej $2 \div 4$), które wprawdzie ma charakter empiryczny i nie obejmuje całego zakresu zależności, ale wystarcza do jej opisu w obrębie parametrów występujących w technologii przetwórstwa. Prawo

potęgowe umożliwia łatwe obliczenia dotyczące przepływów i wygodne graficznie przedstawienie krzywych płynięcia (proste w układzie log/log). Warto zwrócić uwagę, że τ jest proporcjonalne do gradientu ciśnienia w strumieniu cieczy, a $\dot{\gamma}$ – do natężenia przepływu. Dzięki temu można krzywe płynięcia przedstawić w parametrach technicznych $\Delta p = f(Q)$ lub $Q = f(\Delta p)$, co wykorzystuje się do opisu przepływu w procesach technologicznych.

Przepływowi towarzyszą naprężenia styczne, mające maksymalne wartości przy ściankach kanałów. Jeżeli w czasie przepływu przez kanał następuje chłodzenie strumienia tworzywa, jego warstwa przyścienna może ulec zestaleniu w stanie naprężonym, co jest jedną z przyczyn powstawania *naprężeń własnych* w gotowych wyrobach. Zjawisko to jest niekorzystne, gdyż naprężenia własne (tak jak i eksploatacyjne) mogą przyczyniać się do korozji naprężeniowej wyrobów.

Ogromną rolę w procesach przetwórstwa tworzyw sztucznych odgrywają ich własności cieplne. Duża rozszerzalność cieplna jest przyczyną dużych zmian wymiarowych i objętościowych wyrobów w przedziale między temperaturą ich formowania i użytkowania (objętość właściwa tworzyw amorficznych może zmienić się do 10%, a częściowo krystalicznych – nawet o 30%!). Efektem tych zmian jest różnica między wymiarami wyrobów i formujących je narzędzi, sięgająca paru procent (nazywana *skurczem technologicznym*), którą musi uwzględniać konstruktor przy projektowaniu narzędzi. Mały współczynnik przewodzenia ciepła tworzyw bardzo utrudnia prowadzenie procesów formowania, w których materiał na ogół musi być wstępnie ogrzany, a po uformowaniu ochłodzony. O ile można przyspieszyć proces ogrzewania (stosując ogrzewanie konwekcyjne lub zamieniając na ciepło energię mechaniczną czy energię pola elektromagnetycznego), o tyle chłodzenie gotowego wyrobu może odbywać się tylko na zasadzie (bardzo powolnego) przewodzenia ciepła. W takich warunkach wyrób nie zmienia swej temperatury jednakowo w całej masie; stygnięcie przebiega z zachowaniem gradientu temperatury w ściance wyrobu, w efekcie czego ma charakter warstwowy (każda izotermiczna warstwa tworzywa stygnie inaczej i inaczej się kurczy). Ostatecznym efektem takiego przebiegu chłodzenia jest powstanie *naprężeń własnych* w wyrobach – ściskających w warstwach zewnętrznych i rozciągających wewnątrz ścianek wyrobów. Jest to druga poważna przyczyna *naprężeń własnych* ograniczających trwałość użytkową wyrobów z powodu korozji naprężeniowej. Doskonalenie procesów technologicznych przetwórstwa ma na celu m.in. zmniejszenie *naprężeń własnych* w wyrobach.

Oprócz zjawisk związanych z płynięciem i z przepływem ciepła, które powszechnie występują w procesach przetwórstwa tworzyw sztucznych, w poszczególnych procesach istotne znaczenie mogą mieć także inne zjawiska fizyczne, np. napięcie powierzchniowe, grawitacja, siła odśrodkowa.

2. METODY PRZYGOTOWANIA TWORZYW DO PRZETWÓRSTWA

Aby tworzywo sztuczne można było stosować do zasilania maszyn formujących gotowe wyroby lub półfabrykaty, trzeba mu wcześniej nadać odpowiedni skład, strukturę i postać. Funkcje te spełniają procesy przygotowawcze (nazywane też procesami obróbki wstępnej), do których należą rozdrabnianie, mieszanie, homogenizacja, konfekcjonowanie i suszenie. Obejmują one całą drogę technologiczną polimeru od surowego produktu procesów chemicznych do gotowego tworzywa nadającego się do formowania. W zależności od rodzaju tworzywa i stosowanego później procesu formowania dobiera się odpowiednie (i w odpowiedniej kolejności) procesy spośród wymienionych. Procesy przygotowawcze mogą być realizowane w zakładach produkujących polimery, w zakładach produkujących gotowe wyroby, lub dwuetapowo – częściowo w pierwszych i częściowo w drugich.

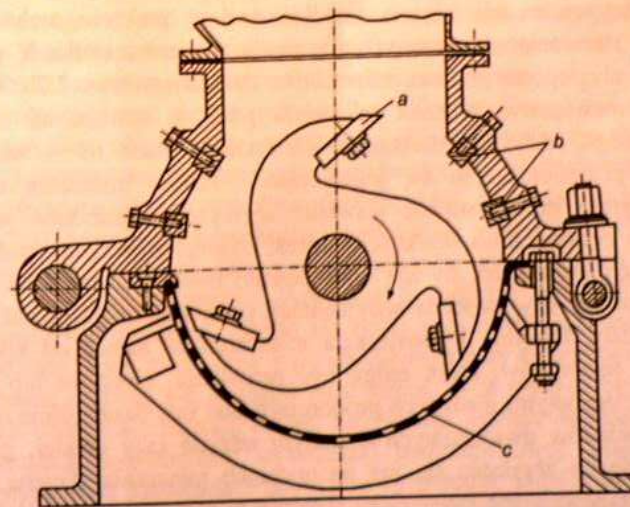
ROZDRABNIANIE

Surowe polimery są na ogół produktami drobnoziarnistymi lub ciekłymi, rzadko tylko (np. żywice nowolakowe) występują w postaci brył wymagających rozdrabniania. Także środki pomocnicze dodawane do polimerów są przez dostawców oferowane w postaci potrzebnej przetwórcy i nie wymagają rozdrabniania. W każdym jednak zakładzie produkującym wyroby z tworzyw sztucznych powstają odpady (braki, nadlewy itp.), które nadają się do ponownego wykorzystania w produkcji pod warunkiem uprzedniego ich rozdrobnienia. Wszystkie metody rozdrabniania polegają na pokonaniu sił spójności (kohezji) materiału dzięki działaniom mechanicznym. Wymagają one zużycia energii, której ilość jest proporcjonalna do wytrzymałości materiału i przyrostu sumarycznej powierzchni jego ziaren. Powierzchnia ta wzrasta proporcjonalnie do zmniejszania się wielkości ziaren w miarę ich rozdrabniania (np. zmniejszenie wymiarów ziaren o połowę powoduje dwukrotne zwiększenie ich sumarycznej powierzchni). Ze względów ekonomicznych nie powinno się tracić energii na rozdrabnianie materiału w stopniu większym, niż niezbędnie konieczny z racji wymogów procesu technologicznego.

Materiały twarde i kruche rozdrabnia się w procesach *mielenia*, które polegają na dynamicznym ściskaniu lub jednoczesnym dynamicznym ściskaniu

i ścinaniu. Dynamiczne ściskanie występuje np. w młynach kulowych – są to obracane wolno zbiorniki cylindryczne, w których zamyka się materiał rozdrabniany wraz z ciężkimi kulami. Aby nie tracić energii na nadmierne rozdrabnianie części materiału (rozkład wielkości ziaren podlega tu prawom statystyki), modernizuje się mielenie przez stosowanie młynów kulowych pracujących w sposób ciągły – materiał po przejściu przez młyn jest segregowany na sitach i cząstki zbyt duże są zawracane do mielenia. Dynamiczne obciążenia ściskająco-ścinające występują w młynach uderowych i młotkowych, w których materiał dostaje się między elementy wirujące i nieruchome – także tutaj stosuje się ciągłą obróbkę materiału i odsiewanie, z zawracaniem cząstek niedostatecznie rozdrobnionych do procesu.

Materiały o dużej wytrzymałości rozdrabnia się w procesach *granulowania* za pomocą granulatorów nożowych (rys. 2.1). Doprowadzany do nich w sposób ciągły materiał dostaje się do cylindrycznej komory między noże nieruchome umieszczone na jej obwodzie a noże ruchome umieszczone na wirniku. Noże powodują podział elementów na części w wyniku dynamicznego ścinania (w przypadku materiałów sztywnych) lub cięcia rozdzielającego (materiałów odkształcalnych). Kąt ostrzy noży ruchomych musi być dostosowany do właściwości mechanicznych materiału (mały dla tworzyw odkształcalnych, bliski kątowni prostemu – dla sztywnych). Aby zapobiec stratom energii na nadmierne rozdrabnianie, część ściany komory granulatora wykonuje się w postaci płyty sitowej o otworach odpowiadających potrzebnej wielkości cząstek materiału – dostatecznie rozdrobniony materiał jest wysysany z granulatora przez zainstalowany za płytą sitową wentylator. Ziarna produktu powstającego w wyniku rozdrabniania mają kształt nieregularny.



Rys. 2.1. Schemat granulatora nożowego

MIESZANIE WSTĘPNE

Tworzywa sztuczne są mieszaninami polimerów ze środkami pomocniczymi. Aby środki pomocnicze prawidłowo spełniały swe funkcje, powinny być równomiernie rozproszane w tworzywie; uzyskuje się to wstępnie w wyniku procesu mieszania. Miara skuteczności procesu mieszania jest stopień jednorodności mieszanki. Jego miarą stanowi wielkość najmniejszej cząstkowej objętości mieszanego materiału, w której udziały procentowe składników odpowiadają jeszcze składowi całej jego objętości. Maksymalnym, osiągalnym teoretycznie efektem mieszania jest taka sytuacja, w której ta cząstkowa objętość jest tak mała, że znajduje się w niej tylko jedna cząstka składnika występującego w mieszaninie w najmniejszym stężeniu.

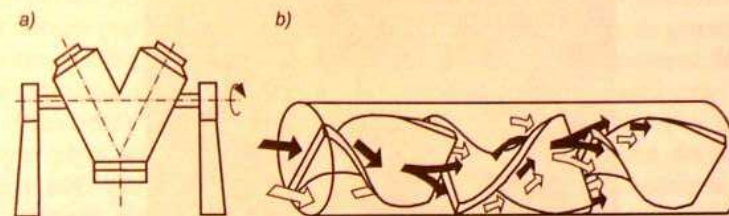
Modelowym przedstawieniem procesu mieszania może być wielokrotnie powtarzane, cykliczne dzielenie porcji połączonych składników na dwie części i łączenie ich w innym wzajemnym ułożeniu. Efektywność takiego procesu można przedstawić schematycznie:

$$a = \left(\frac{1}{2k}\right)^n a_0$$

gdzie: a – wielkość omawianej cząstkowej objętości, a_0 – objętość porcji mieszanych składników, n – liczba cykli podziału i łączenia, k – współczynnik efektywności ($0,5 \leq k \leq 1$, przy czym $k = 1$ odpowiada efektywności maksymalnej, a $k = 0,5$ oznacza brak efektywności). W procesie tak opisanym współczynnik k nie ma wartości stałej – jest on funkcją n i stopniowo maleje do wartości minimalnej w miarę postępu procesu.

Ta modelowa zasada została zrealizowana w praktyce technologicznej w procesie mieszania okresowego za pomocą tzw. mieszalnika V (rys. 2.2a) i mieszania ciągłego za pomocą mieszalnika statycznego (rys. 2.2b). Inne konstrukcyjne rozwiązania procesu mieszania polegają zawsze na wywołaniu zróżnicowanego ruchu w mieszanym materiale i przez to – wzajemnym, zmiennym przemieszczaniu się jego cząstek. Proces mieszania może być zakłócany przez przeciwstawne zjawisko segregacji składników wynikające z różnej ich gęstości i/lub wielkości cząstek. Dlatego mieszanie trzeba prowadzić w takich warunkach, by nie występowało swobodne spadanie, działanie sił odśrodkowych czy swoboda sedymentacji (przy mieszaniu proszków z cieczami). Zasady działania i konstrukcja mieszalników zależą od konsystencji mieszanych materiałów, które mogą być proszkami, cieczami lub układami proszkowo-cieczowymi o różnych proporcjach obu faz. Szczególnie trudne jest mieszanie układów dwufazowych o małym udziale fazy ciekłej, gdyż mają one tendencję do zbrylania się już na początku mieszania. Trzeba stosować mieszalniki zapewniające intensywne ścinanie w mieszanym materiale, a więc mające odpowiednio wytrzymałe elementy mieszające i mocne napędy.

W procesie wstępnego mieszania wielkość cząstek składników stałych nie ulega zmniejszeniu, co ogranicza możliwości ujednorodnienia składu mieszanki. Stopień jednorodności mieszanki może nie być dostateczny do prowadzenia



Rys. 2.2. Schemat mieszalnika V (a) i zasada działania mieszalnika statycznego (b)

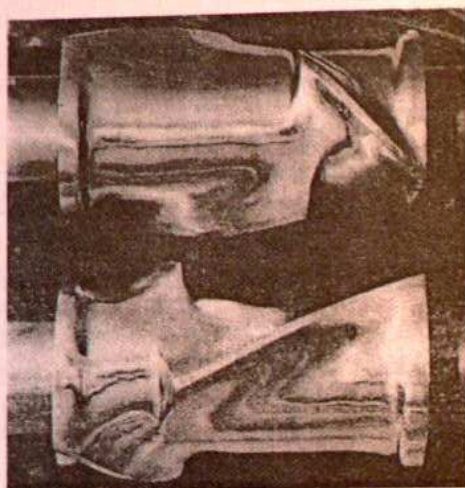
procesów technologicznych formowania wyrobów. Mieszanka nie ma charakteru trwałego i może ulegać segregacji w operacjach magazynowania, transportu, dozowania itp. Aby usunąć te niedostatki efektów mieszania wstępnego, często stosuje się proces homogenizacji.

HOMOGENIZACJA

Celem homogenizacji jest polepszenie i utrwalenie jednorodności mieszanki. Efekt ten uzyskuje się przez doprowadzenie wstępnie przygotowanej mieszanki do stanu cieczy o bardzo dużej lepkości (najczęściej przez stopienie zawartego w niej polimeru) i poddawanie bardzo intensywnemu ścinaniu, w wyniku którego cząstki stałych składników mieszanki ulegają rozdrobieniu, a cały materiał zostaje poddany dodatkowemu wymieszaniu. Duża lepkość mieszanki zapobiega jej wtórnemu rozfrakcjonowaniu.

Proces homogenizacji można prowadzić w układzie *okresowym*, stosując do tego celu specjalne urządzenia – mieszalniki ciśnieniowe (nazywane też zamkniętymi), zapożyczone z przemysłu gumowego. Są to masywne komory, w których obracają się dwa współpracujące ze sobą, odpowiednio profilowane wały (rys. 2.3). Między powierzchniami wałów oraz między nimi i powierzchnią komory panują warunki intensywnego ścinania, wywołującego przemieszczanie się i mieszanie materiału. Powoduje to zamianę na ciepło ogromnej energii napędu wałów, dzięki czemu nie tylko mieszanka ulega stopieniu, ale także chłodzony wodą mieszalnik staje się źródłem pary technologicznej. Cały cykl mieszania odbywa się w ciągu paru minut. W nowszych procesach homogenizacji stosuje się metodę *ciągłą*. Urządzenia służące do tego celu działają na zasadzie współbieżnej wylączarki dwuślimakowej. Mają specjalne strefy intensywnego mieszania i otwory w cylindrach, które umożliwiają doprowadzanie składników do mieszanki w odpowiednich fazach procesu mieszania (niektóre procesy homogenizacji zapewniają tak intensywne mieszanie

materiału, że umożliwiają pominięcie fazy wstępnego mieszania składników mieszanki).



Rys. 2.3. Widok roboczej części wałów mieszalnika ciśnieniowego

Produktem wszystkich procesów homogenizacji jest jednorodny, stopiony materiał w postaci brył (z procesu okresowego) lub ciągłego strumienia (z procesu ciągłego).

KONFEKCJONOWANIE

Procesy formowania wyrobów i stosowane w nich urządzenia wymagają różnych postaci zasilającego je materiału. Nadanie odpowiedniej do potrzeb postaci przygotowanemu tworzywu jest zadaniem procesów konfekcjonowania.

Do niektórych procesów formowania wyrobów (np. kalandrowania) materiał powinien być dostarczany w postaci *ciągłego strumienia stopionego tworzywa*; wystarczy wtedy sprzęgnąć urządzenie do homogenizacji ciągłej z urządzeniem formującym wyrób (np. z kalandrem). Znacznie częściej jednak procesy formowania wymagają stosowania tworzywa ochłodzonego w postaci sypkiego *granulatu*. Granulat powinien składać się z ziaren o jednokowej wielkości i kształcie, gdyż od tego zależy stałość warunków pracy urządzenia formującego (np. wytłaczarki) i stałość wymiarów produkowanych wyrobów. Granulaty można otrzymać w różny sposób:

1. Bryły stopionego tworzywa otrzymane w wyniku homogenizacji okresowej rozwalcowuje się na ciągłą taśmę, którą po ochłodzeniu tnie się wzdłużnie na wąskie paski (nożami krążkowymi), a następnie wprowadza promieniowo do komory granulatora nożowego i tnie poprzecznie na prostopadłości

(przy odpowiednim dobraniu prędkości wirnika granulatora do prędkości taśmy można uzyskać granulaty o ziarnach sześciennych).

2. Urządzenie do homogenizacji ciągłej można zakończyć głowicą z ustnikiem w postaci płyty sitowej z otworami o kształcie kołowym. Wytłaczane przez ustnik okrągłe prety po ochłodzeniu wprowadza się promieniowo do *granulatora nożowego*, w którym zostają pocięte na ziarna o kształcie cylindrycznym; długość ziaren cylindrycznych można regulować prędkością wirnika granulatora.

3. Urządzenie do homogenizacji ciągłej łączy się z głowicą o ustniku będącym płytą sitową z otworami kołowymi. Do czoła ustnika dociska się wirujący nóż, który ścina wytłaczane prety w miarę ich wychodzenia z ustnika. Długość ziaren granulatu cylindrycznego (poczynając od cienkiej soczewki) reguluje się kontrolując prędkość wirującego noża. Granulaty można chłodzić w różny sposób: przedmuchać zimnym powietrzem, zanurzając głowicę pod wodę lub omywać jej obwód pierścieniem wodnym.

Aby uniknąć pylenia i ułatwić dozowanie tworzyw termoutwardzalnych w procesach prasowania, często stosuje się tworzywo w postaci tabletek. Tabletki wykonuje się z tworzyw proszkowych metodą prasowania na zimno przy użyciu tabletek — odpowiednio wyposażonych pras hydraulicznych lub mimośrodowych. Wielkość tabletek dobiera się tak, by całkowita ich ilość stanowiła porcję potrzebną do wykonania wyrobu.

SUSZENIE

Tworzywa mogą ulec zawilgoceniu z dwóch powodów:

1. Gdy zimny materiał (np. zimną przyniesiony z magazynu) zetknie się z ciepłym, wilgotnym powietrzem, wtedy na powierzchni ziaren tworzywa kondensuje się wilgoć z powietrza (dotyczy to wszystkich tworzyw).

2. Tworzywa zawierające składniki o budowie polarnej mają tendencję do pochłaniania wilgoci z otoczenia, przy czym wilgoć zostaje wchłonięta przez całą masę tworzywa. Stopień możliwego zawilgocenia w stanie równowagi zależy od wilgotności względnej otaczającego powietrza (np. rys. 2.4), przy czym dochodzenie do stanu równowagi między wilgotnością powietrza a wilgotnością tworzywa może być bardzo powolne (rys. 2.5).

Wilgoć jest niepożądanym składnikiem tworzyw sztucznych, gdyż:

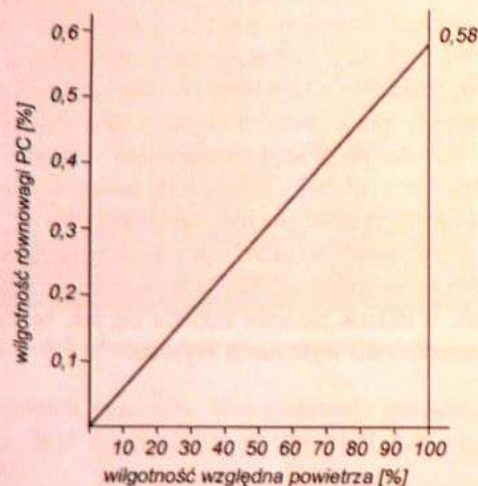
1) ujawnia się w gotowych wyrobach w postaci nieestetycznych smug na powierzchni i pęcherzy w masie wyrobów, osłabiając ich właściwości użytkowe;

2) w tworzywach podatnych na hydrolizę w wysokiej temperaturze procesu formowania wyrobów może nastąpić degradacja polimeru niwecząca użyteczność materiału i wykonanych z niego wyrobów. W związku z tym dopuszczalna zawartość wilgoci w takich tworzywach jest bardzo mała (np. w poliwęglanie $< 0,015\%$, w poliamidzie $< 0,1\%$).

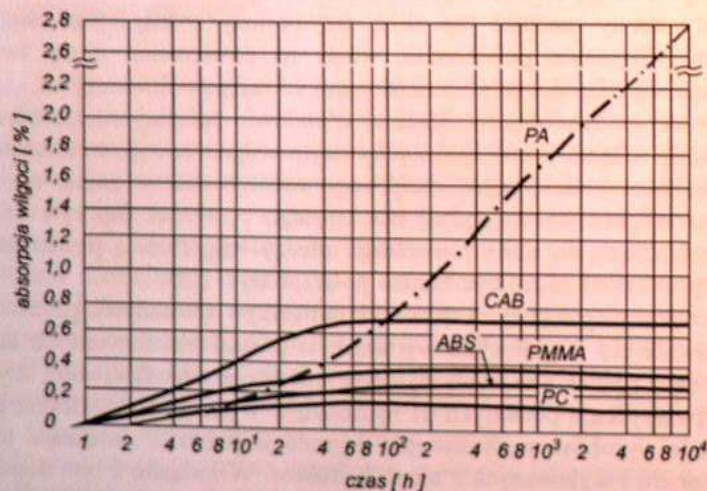
Aby uchronić się przed skutkami obecności wilgoci w tworzywie konieczne jest jego suszenie przed użyciem do formowania wyrobu. Mechanizm suszenia ziarnistego materiału jest skomplikowany; składa się z kilku faz:

1) dyfuzja wilgoci z wnętrza ziaren na ich powierzchnię – zależna od temperatury, gradientu stężenia i wielkości ziaren (faza ta nie występuje przy powierzchniowym jedynie zawilgoceniu materiału);

2) odparowanie wilgoci z powierzchni ziaren – zależne od dostarczenia ciepła potrzebnego do odparowania (woda ma bardzo duże ciepło parowania);



Rys. 2.4. Zależność wilgotności poliwęglanu od wilgotności względnej powietrza (w stanie równowagi)

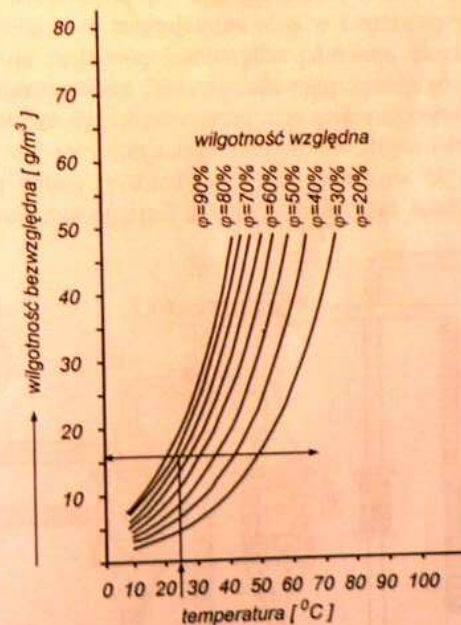


Rys. 2.5. Przebieg pochłaniania wilgoci przez różne tworzywa sztuczne (w temperaturze 23°C, przy wilgotności względnej powietrza 40%)

3) dyfuzja pary wodnej przez laminarną, nieruchomą mikrowarstewkę powietrza przylegającą do tworzywa – zależna od temperatury, grubości mikrowarstewki (a ta jest zależna od prędkości przepływu powietrza suszącego) i wilgotności względnej powietrza suszącego (faza ta nie występuje przy suszeniu próżniowym);

4) usunięcie pary wodnej z przestrzeni suszenia.

Nawet bez szczegółowej analizy powyższych zjawisk można zauważyć, że w procesie suszenia bardzo ważną rolę odgrywa temperatura suszenia – im jest wyższa, tym większa jest prędkość dyfuzji, tym mniejsza wilgotność względna powietrza suszącego o określonej wilgotności bezwzględnej (rys. 2.6) i tym więcej ciepła można wykorzystać do odparowania wilgoci. Temperatura suszenia musi być jednak o 10–20 K niższa od temperatury mięknięcia tworzywa (by nie uległo zbryleniu). Należy też uwzględniać podatność na utlenianie niektórych tworzyw w podwyższonej temperaturze (nawet niższej od temperatury mięknięcia). Istotną rolę w procesie suszenia odgrywa także intensywność przepływu powietrza suszącego (od niej zależy m.in. ilość ciepła dostarczana tworzywu a potrzebna do odparowania wilgoci) oraz jego wilgotność.

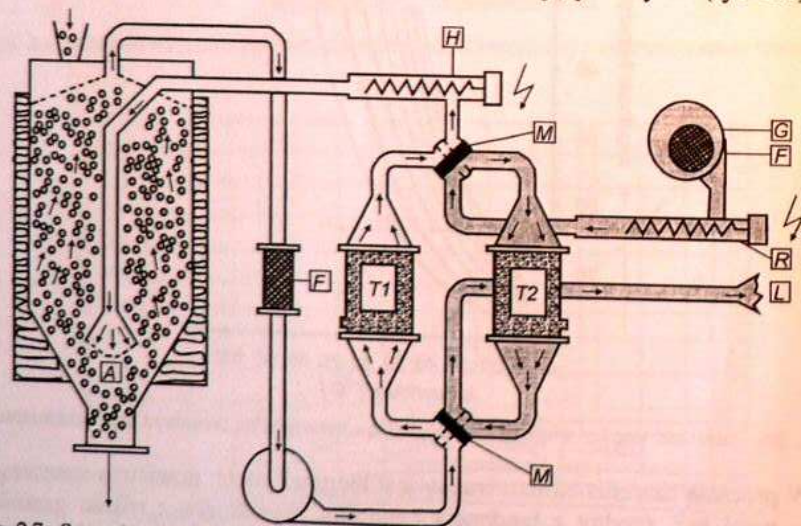


Rys. 2.6. Zależność między wilgotnością względną i bezwzględną powietrza oraz temperaturą

W procesie suszenia bardzo ważny jest kierunek ruchu powietrza suszącego, który musi być zgodny z tendencją naturalną, wynikającą z różnic gęstości. Suche, gorące powietrze jest cięższe od powietrza wilgotnego (nawet zimniejszego z powodu oddania ciepła na odparowanie wilgoci), dlatego ruch suszącego powietrza musi się zawsze odbywać z dołu do góry. Zasada ta jest stosowana w różnych rozwiązaniach technologicznych, spośród których warto wymienić:

1. *Suszenie w złożu fluidalnym.* Polega na przedmuchiwaniu gorącego powietrza z dużą intensywnością przez zbiornik z dnem porowatym. W zbiorniku znajduje się drobnoziarnisty materiał suszony, który tworzy wraz z przepływającym powietrzem złoże fluidalne. W złożu tym następuje intensywne suszenie, jednak czas kontaktu powietrza z tworzywem jest krótki, dlatego odlotowe powietrze jest jeszcze ciepłe i częściowo tylko nasycone wilgocią. Aby lepiej wykorzystać energię zawartą w powietrzu, zwraca się je do obiegu po częściowej tylko wymianie na świeże powietrze atmosferyczne (i po ponownym ogrzaniu).

2. *Suszenie przeciwprądowe granulatu.* Polega na ciągłym zasilaniu zbiornika od góry suszonym granulatem i odbieraniu dołem materiału wysuszonego, gorącego (na ogół wykorzystywanego od razu do zasilania urządzeń formujących wyroby). Przez granulat jest przedmuchiwane od dołu powietrze suszące, które w pierwszym momencie, gdy ma największą zdolność suszenia, styka się z granulatem o zmniejszonej już zawartości wilgoci (a najtrudniej usunąć z granulatu pozostałość wilgoci). W wyższej części zbiornika świeży granulat łatwo przekazuje wstępne porcje wilgoci nawet częściowo zawilżonemu i mniej gorącemu powietrzu. Także i tutaj stosuje się półzamknięty (z częściowym zwracaniem) obieg powietrza w celu zmniejszenia strat energetycznych. Aby uwolnić się od wpływu zmiennej wilgotności powietrza atmosferycznego na przebieg suszenia i zwiększyć jego efektywność, zastosowano w tym systemie zamknięty obieg powietrza suszącego, przeprowadzając zużyte powietrze przez pochłaniacze wilgoci i nagrzewnice (pracujące cyklicznie lub w sposób ciągły) przed zawróceniem do suszenia. Jest to najbardziej godny polecenia sposób suszenia granulatu przed zasilaniem urządzeń formujących wyrób (rys. 2.7).



Rys. 2.7. Suszenie przeciwprądowe w układzie zamkniętego obiegu powietrza, z przemianą regeneracją pochłaniaczy wilgoci (A – wlot powietrza, T₁, T₂ – pochłaniacze wilgoci, M – zasuwki zamiany obiegów pochłaniania i regeneracji, G – dmuchawa obiegu regeneracyjnego, F – filtry mechaniczne, H – nagrzewnica obiegu suszenia, R – nagrzewnica obiegu regeneracyjnego, L – wylot obiegu regeneracyjnego)

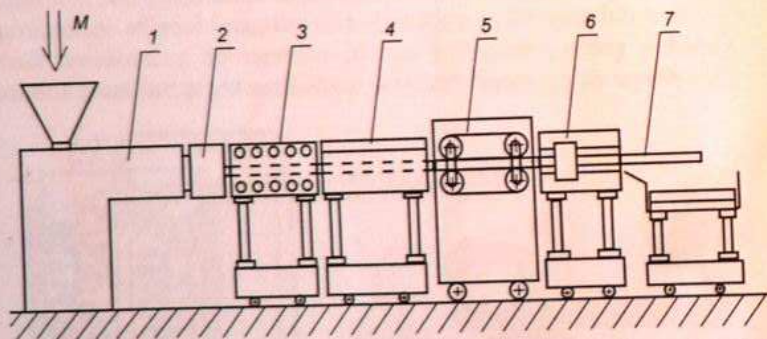
3. *Suszenie próżniowe,* w czasie którego nie ma ruchu powietrza, a jedynie pompa próżniowa usuwa parę wodną uchodzącą z suszonego materiału. Zaletą tej metody jest możliwość suszenia tworzyw, które w tej samej temperaturze w kontakcie z powietrzem uległyby utlenieniu. Wadą tego procesu jest ograniczona możliwość dostarczania ciepła potrzebnego do odparowania wilgoci, gdyż zamiast efektywnego przenoszenia konwekcyjnego (stosowanego w poprzednio przedstawionych metodach) można tu korzystać tylko z mało wydajnego ogrzewania przez przewodzenie. Z tego względu suszenie próżniowe jest stosowane na niewielką skalę.

3. METODY PRZETWÓRSTWA TWORZYW

3.1. WYTŁACZANIE

3.1.1. WPROWADZENIE

Wytłaczanie jest procesem ciągłego formowania wyrobów z tworzyw sztucznych. Polega na uplastycznianiu tworzywa w wytłaczarce i następnie przepychaniu tego tworzywa pod wpływem ciśnienia wytworzonego w wytłaczarce przez głowicę formującą wyrób. Realizowane jest w linii technologicznej wytłaczania, w skład której wchodzi: wytłaczarka, głowica, urządzenia kalibrujące i chłodzące oraz urządzenia odbierające i odcinające (rys. 3.1). W ramach tej technologii otrzymuje się różnego typu profile ciągłe: pręty, rury, folie itp.



Rys. 3.1. Schemat linii technologicznej wytłaczania rur: M – tworzywo, 1 – wytłaczarka, 2 – głowica, 3 – kalibrator, 4 – urządzenie chłodzące, 5 – urządzenie odbierające, 6 – urządzenie odcinające, 7 – wytłaczana rura

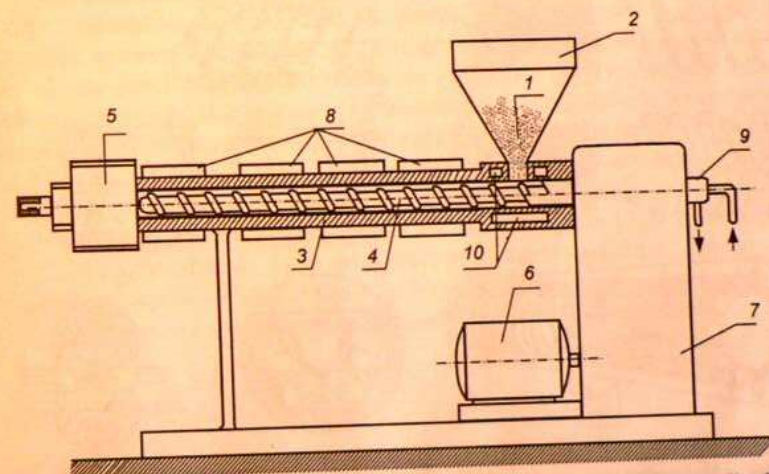
Podstawą linii technologicznej wytłaczania jest wytłaczarka, której zadaniem jest dostarczanie do głowicy odpowiednio ujednolodzonego tworzywa – przy określonym natężeniu przepływu (wydajności procesu), ciśnieniu i temperaturze (rys. 3.2). Wytłaczarka składa się z układu napędzającego (silnika, przekładni), układu uplastyczniającego (zasobnika, cylindra, ślimaka, grzejników, wentylatorów) oraz układu sterowania (mocy, temperatury itp.).

Podstawowe znaczenie w procesie wytłaczania ma układ uplastyczniający, który spełnia następujące funkcje:

- nagrzewanie przetwarzanego materiału;
- sprężanie, mające na celu wytworzenie odpowiedniego ciśnienia w tworzywie;

- mieszanie, prowadzone w celu ujednolodzenia składu, własności (cieplnych i mechanicznych) oraz struktury materiału;
- transportowanie tworzywa przez układ w kierunku głowicy.

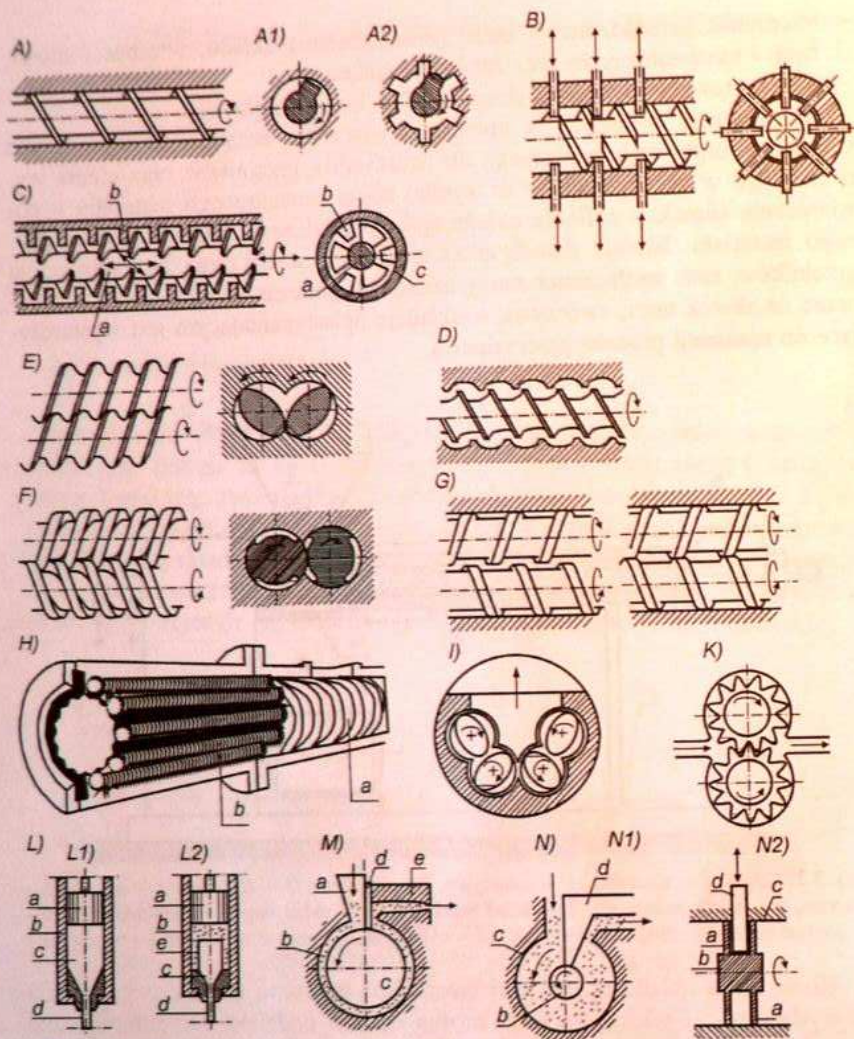
Nagrzewanie tworzywa w procesie wytłaczania zachodzi zazwyczaj pod wpływem ciepła doprowadzanego do tworzywa z grzejników oraz ciepła wytwarzanego w tym tworzywie w wyniku tarcia zewnętrznego materiału o powierzchnię ślimaka i cylindra układu uplastyczniającego oraz tarcia wewnętrznego materiału. Istnieje jednak także możliwość wytłaczania bez stosowania grzejników, tzw. wytłaczania autotermicznego, podczas którego ciepło wytwarzane na skutek tarcia tworzywa w układzie uplastyczniającym jest wystarczające do realizacji procesu przetwórstwa.



Rys. 3.2. Schemat wytłaczarki: 1 – tworzywo, 2 – zasobnik, 3 – cylinder, 4 – ślimak, 5 – głowica, 6 – silnik napędowy, 7 – układ przekładni, 8 – układ nagrzewająco-chłodzący, 9 – dopływ czynnika chłodzącego ślimaka, 10 – chłodzenie cylindra w strefie zasypu tworzywa

Konstrukcja układu uplastyczniającego jest podstawą zasadniczego podziału wytłaczarek. I tak, wytłaczarki można ogólnie podzielić na: jednoślismakowe, dwuślismakowe i specjalnej konstrukcji. Wytłaczarki jednoślismakowe mogą mieć gładkie lub rowkowane cylindry oraz mogą być wyposażone w ślimaki konwencjonalne (o kanale ciągłym wzdłuż całej długości roboczej) lub niekonwencjonalne (np. z elementami intensyfikującymi ścinanie, mieszanie itp.). Wytłaczarki dwuślismakowe mogą być współbieżne lub przeciwbieżne, o różnym stopniu zazębienia ślimaków (zazębiające się, nie zazębiające się). Do grupy wytłaczarek specjalnej konstrukcji należą wytłaczarki tłokowe, tarczowe, planetarne, kaskadowe itd.

Najważniejsze rodzaje wytłaczarek przedstawiono na rys. 3.3, przy czym podstawowe znaczenie mają obecnie wytłaczarki ślimakowe: jednoślismakowe z gładkimi lub rowkowanymi cylindrami oraz dwuślismakowe współbieżne lub przeciwbieżne.



Rys. 3.3. Przegląd najważniejszych typów wylaczarek: A) wylaczarka jednoślakowa z klasycznym ślimakiem i cylindrem: A1) gładkim, A2) rowkowanym; B) wylaczarka trzpieniowa, C) wylaczarka typu ko-kneter: a – ślimak, b – występy cylindra, c – cylinder; D) wylaczarka z cylindrem z wgłębieniami; E) wylaczarka dwuślakowa współbieżna z zazębiającymi się ślimakami; F) wylaczarka dwuślakowa przeciwbieżna z zazębiającymi się ślimakami; G) wylaczarka dwuślakowa przeciwbieżna ze ślimakami nie zazębiającymi się; H) wylaczarka planetarna: a – sekcja zasilająca jednoślakowa, b – sekcja planetarna; I) wylaczarka czteruślakowa do odgazowywania; K) wylaczarka z pompą zębatą; L) wylaczarka tłokowa: L1) układ klasyczny, L2) układ hydrostatyczny: a – tłok, b – cylinder, c – wstępnie zagęszczone tworzywo, d – wylaczany pret, e – ciecz pośrednicząca; M) wylaczarka walcowa: a – zasobnik, b – cylinder, c – walec, d – przegroda zgarniająca, e – dysza formująca; N) wylaczarka tarczowa: N1) przekrój w płaszczyźnie tarcz, N2) przekrój osiowy: a – tarcze obrotowe, b – wał napędowy, c – cylinder, d – element dławiący przepływ

Wylaczarki są zwykle zasilane tworzywem w stanie stałym (wylaczarki plastyfikujące), choć mogą też być zasilane tworzywem w stanie ciekłym (wylaczarki stopu).

3.1.2. WYTŁACZANIE JEDNOŚLIKOWE

Podstawowe znaczenie w przetwórstwie ma wytłaczanie jednoślakowe. Typowa wylaczarka jednoślakowa jest przedstawiona na rys. 3.2. Tworzywo (1) jest dostarczane do cylindra (3) układu uplastyczniającego przez zasobnik (2), a następnie transportowane za pomocą obracającego się ślimaka (4) w kierunku głowicy (5). Ślimak jest napędzany silnikiem (6) za pośrednictwem układu przekładni (7). Nagrzewanie tworzywa odbywa się za pomocą układu nagrzewająco-chłodzącego (8), złożonego z grzejników i wentylatorów (wentylatory ułatwiają sterowanie przebiegiem procesów cieplnych w układzie ślimakowym). Sterowanie to jest niekiedy również realizowane przez chłodzenie wodą lub powietrzem (9) wydrążonego – w tym przypadku – ślimaka (4). Aby granulki tworzywa w zasobniku (2) nie ogrzewały się i nie uplastyczniały, a przez 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 (10).

3.1.2.1. Ślimaki

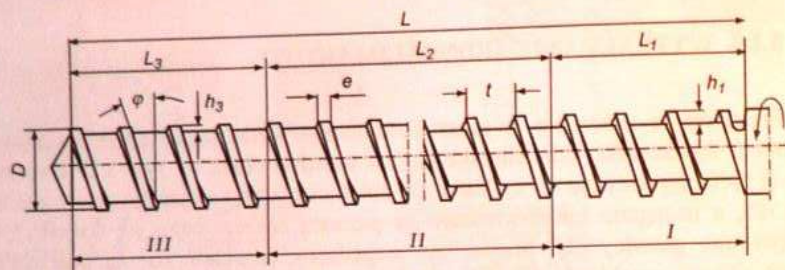
Podstawowym elementem wylaczarki jest ślimak. Ślimaki w układach jednoślakowych dzieli się ogólnie na ślimaki klasyczne i niekonwencjonalne. Klasyczny trójstrefowy ślimak opisują następujące wielkości geometryczne (rys. 3.4):

- | | |
|---|-------------|
| – średnica zewnętrzna | D , |
| – całkowita długość ślimaka | L , |
| – długość strefy zasilania I | L_1 , |
| – długość strefy sprężania II | L_2 , |
| – długość strefy dozowania III | L_3 , |
| – głębokość zwoju ślimaka w strefie zasilania | h_1 , |
| – głębokość zwoju ślimaka w strefie dozowania | h_3 , |
| – kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka | φ , |
| – skok linii śrubowej ślimaka | t , |
| – szerokość zwoju ślimaka | e , |
| – szczelina między zwojem ślimaka a cylindrem | h_f . |

Podstawowymi wielkościami charakteryzującymi ślimak są:

- stosunek długości ślimaka do średnicy L/D oraz
- stopień sprężania, czyli stosunek głębokości kanału w strefie zasilania do głębokości kanału w strefie dozowania; stopień ten – w celu zapewnienia

ciągłości przepływu tworzywa – musi być co najmniej równy stosunkowi objętości właściwej tworzywa w stanie stałym w strefie zasilania (objętości właściwej nasypowej) do objętości właściwej tworzywa w stanie uplastycznionym w strefie dozowania.



Rys. 3.4. Wymiary charakterystyczne ślimaka (oznaczenia w tekście)

W zależności od zastosowania i wymaganej wydajności procesu wytłaczania, ślimaki mają bardzo zróżnicowane wymiary:

- średnica: od kilkunastu mm do 300 mm,
- długość: $6D \div 30D$,
- stopień sprężania: $1,3 \div 5$ dla tworzyw termoplastycznych i $1 \div 1,5$ dla tworzyw termoutwardzalnych.

Wyróżnione powyżej strefy geometryczne ślimaka spełniają następujące funkcje:

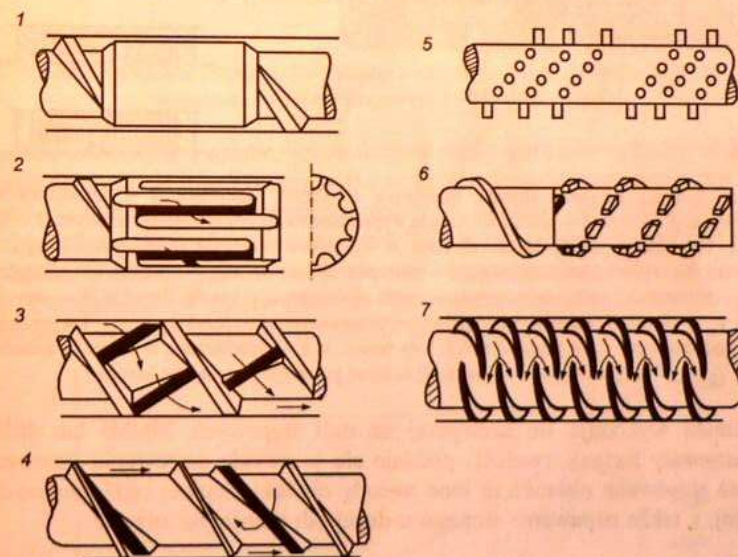
- strefa zasilania I: pobranie tworzywa z zasobnika, zagęszczanie i transport tworzywa;
- strefa sprężania (przemiany) II: uplastycznianie, sprężanie i transport tworzywa;
- strefa dozowania III: ujednolicanie uplastycznionego tworzywa i transport do głowicy przy określonym ciśnieniu i temperaturze.

Strefy te w przybliżeniu odpowiadają trzem strefom charakteryzowanym różnym stanem fizycznym tworzywa, a mianowicie:

- strefie ciała stałego, w której tworzywo występuje w stanie stałym, w postaci proszku lub granulatu, bardziej lub mniej zagęszczone;
- strefie uplastyczniania, w której zachodzi uplastycznianie tworzywa i w której występuje zarówno tworzywo w stanie stałym jak i tworzywo uplastycznione;
- strefie tworzywa uplastycznionego, w której całkowicie uplastycznione tworzywo jest pompowane w kierunku głowicy.

Ślimaki klasyczne są zwykle konstruowane tak, aby strefa sprężania odpowiadała strefie uplastyczniania. Ponieważ jednak przebieg uplastyczniania tworzywa zależy od warunków technologicznych wytłaczania, nie jest to osiągalne w każdym przypadku.

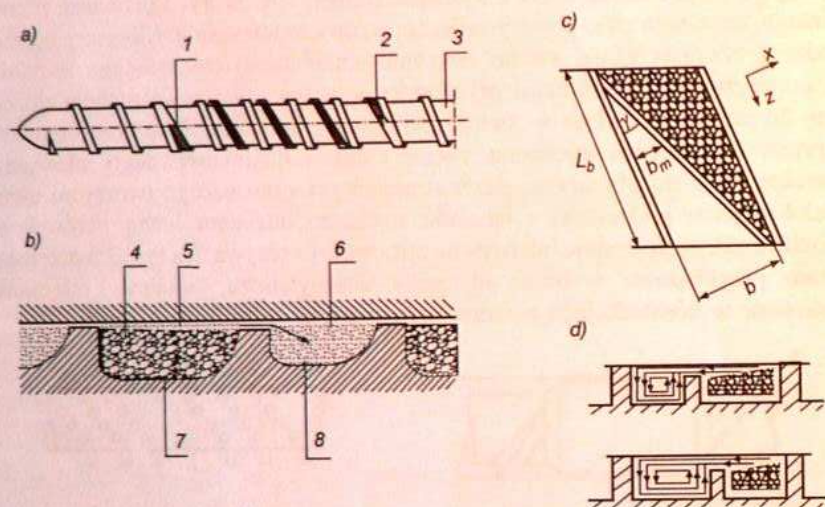
Aby zwiększyć efektywność procesów zachodzących w układzie uplastyczniającym wytłaczarki, konstruowano wiele innych ślimaków o różnych kształtach i wymiarach, zwanych ślimakami niekonwencjonalnymi. Ślimaki te ogólnie charakteryzują się tym, że mogą zawierać na długości części roboczej odcinki nieciągłości kanału śrubowego, mogą mieć mniejszy od jedności miejscowy stopień sprężania oraz mogą być zaopatrzone w specjalnej konstrukcji elementy (sekcje) intensyfikujące ścinanie i mieszanie tworzywa. Chociaż oba te procesy występują jednocześnie, można wyróżnić elementy, w których przeważa proces ścinania, oraz 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 w nich intensywnemu ścinaniu. Natomiast elementy o przewadze procesu mieszania, zwane elementami intensywnego mieszania, charakteryzują się obszarami, gdzie strumień przepływającego tworzywa ulega wielokrotnemu podziałowi i łączeniu z dużym udziałem ruchu obrotowego (zawirowań), co powoduje intensywne mieszanie tworzywa. Na rys. 3.5 przedstawiono przykładowo wybrane elementy intensywnego ścinania i mieszania stosowane w konstrukcjach niekonwencjonalnych.



Rys. 3.5. Elementy intensywnego ścinania i mieszania ślimaków niekonwencjonalnych: 1 – element typu torpeda, 2 – element Maddocka, 3 – element z poprzecznymi zaporami w kanale przepływu, 4 – element Maillefera, 5 – element z występami mieszającymi, 6 – element o nieciągłym uzwojeniu, 7 – element Rheotoc

Na rys. 3.6 przedstawiono schemat działania jednego ze ślimaków niekonwencjonalnych, tzw. ślimaka Maillefera. Istotą tego rozwiązania jest wprowadzenie dodatkowego zwoju w kanale ślimaka, przy czym kąt pochylenia tego

zwoju jest większy od kąta pochylenia linii śrubowej ślimaka. Dodatkowy zwoj spełnia rolę bariery oddzielającej tworzywo w stanie stałym od tworzywa już uplastycznionego. Takie rozwiązanie zapewnia całkowite uplastycznienie tworzywa w strefie ślimaka zawierającej ten dodatkowy zwoj, gdyż granulki tworzywa nie mogą pokonać bariery rozdzielającej; jest to możliwe dopiero po ich uplastycznieniu. Dodatkową zaletą jest to, że tworzywo już uplastycznione przepływając nad barierą poddawane jest intensywnemu ścinaniu.



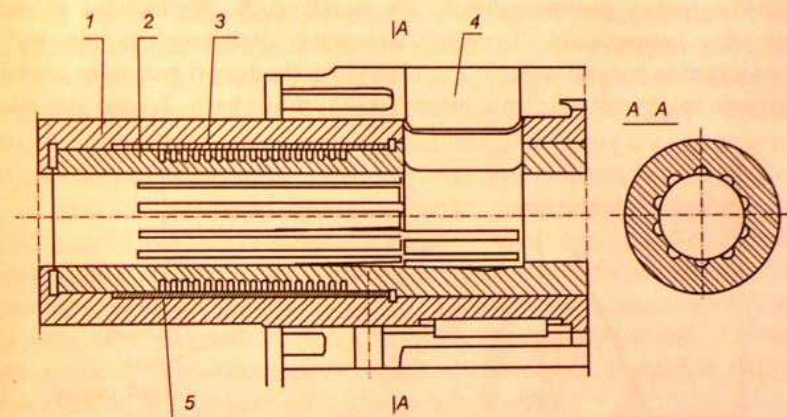
Rys. 3.6. Schemat działania ślimaka Maillefera: a) ślimak Maillefera: 1 – dodatkowy zwoj zaporowy, tzw. bariera, 2 – przestrzeń kanału wypełniana tworzywem uplastycznionym, 3 – kanał ślimaka; b) przekrój osiowy kanału ślimaka: 4 – warstwa tworzywa nieuplastycznionego, 5 – warstewka tworzywa uplastycznionego, 6 – tworzywo uplastycznione, 7 – przestrzeń uplastyczniania, 8 – przestrzeń tworzywa uplastycznionego; c) rozwinięcie kanału ślimaka: b – szerokość kanału, b_m – szerokość przestrzeni wypełnionej tworzywem uplastycznionym, γ – kąt pochylenia zwoju dodatkowego, L_b – długość sekcji barierowej, x, z – współrzędne w kierunku szerokości i długości kanału ślimaka; d) kolejne przekroje poprzeczne kanału

Ślimaki wykonuje się zazwyczaj ze stali stopowych 38HMJ lub 40HM. Aby uzyskać żądaną trwałość, poddaje się je zwykle azotowaniu jonowemu, chociaż stosowane również są inne metody obróbki cieplnej bądź cieplno-chemicznej, a także napawanie stopami o dużej odporności na zużycie.

3.1.2.2. Cylinder

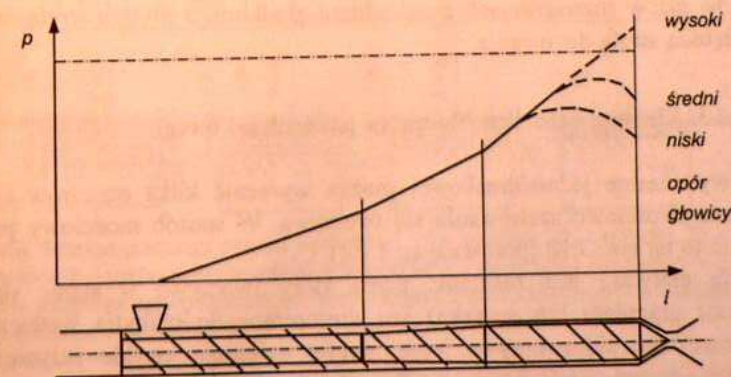
Wyłaczarki mogą być wyposażone w cylindry dwojakiego rodzaju: gładkie lub rowkowane. Cylindry rowkowane mają w strefie zasilania (na długości na ogół $L = 3D$) rowki rozmieszczone na całym obwodzie, wzdłużne lub śrubowe, ze względów technologicznych wykonane w tulei wciśniętej w cylinder. Rowki te mają zmienną głębokość, największą w miejscu zasypu tworzywa do cylindra,

i stopniowo zanikają w strefie zasilania. Rowki powodują zabieranie tworzywa z zasobnika i wprowadzanie do kanału ślimaka, oraz zwiększają tarcie i przez to ciśnienie w strefie zasilania, a w rezultacie – natężenie przepływu tworzywa w wyłaczarce. Strefy rowkowane, w celu zapobieżenia przedwczesnemu uplastycznieniu tworzywa należy intensywnie chłodzić. Przykład rozwiązania konstrukcyjnego strefy rowkowanej przedstawiono na rys. 3.7.



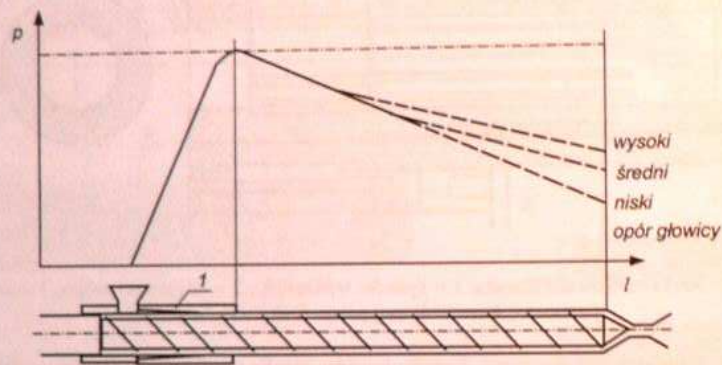
Rys. 3.7. Strefa rowkowana ślimaka: 1 – cylinder wyłaczarki, 2 – tuleja rowkowana, 3 – izolacja termiczna, 4 – otwór zasypowy, 5 – rowki chłodzące

Zastosowane rozwiązanie konstrukcyjne strefy zasilania cylindra w istotny sposób determinuje sposób pracy wyłaczarki. Mianowicie, w maszynach z cylindrami gładkimi ciśnienie tworzywa rośnie w układzie uplastyczniającym od strefy zasilania do strefy dozowania (rys. 3.8), tak że ta ostatnia strefa wyznacza wydajność procesu wyłaczania. Wyłaczarki tego typu charakteryzują się zależnością wydajności od spadku ciśnienia (oporu przepływu) w głowicy. Nie jest to korzystne, gdyż oznacza małą stabilność procesu przetwórczego.



Rys. 3.8. Rozkład ciśnienia w układzie uplastyczniającym klasycznym: p – ciśnienie, l – współrzędna w kierunku długości ślimaka

W maszynach z cylindrami rowkowanymi ciśnienie jest wytwarzane w strefie rowkowanej (rys. 3.9) i ta właśnie strefa determinuje wydajność wytłaczania. Wytłaczarki tego typu charakteryzują się – w porównaniu z wytłaczarkami o gładkich cylindrach – większą wydajnością oraz praktycznie brakiem zależności wydajności od ciśnienia (oporu przepływu) w głowicy, co oznacza większą stabilność wytłaczania. Ponadto, pozwalają one na wytłaczanie materiałów trudno przetwarzalnych, np. proszkowych. Wytłaczarki te mają jednak także istotne wady. Wymagają stosowania silniejszego napędu, wykazują zwiększone zużycie energii, charakteryzują się dużym zużyciem rowków i występuje możliwość zalegania tworzywa w tych rowkach. Trudno jest także



Rys. 3.9. Rozkład ciśnienia w układzie uplastyczniającym niekonwencjonalnym (z cylindrem rowkowanym): p – ciśnienie, l – współrzędna w kierunku długości ślimaka, 1 – strefa rowkowana

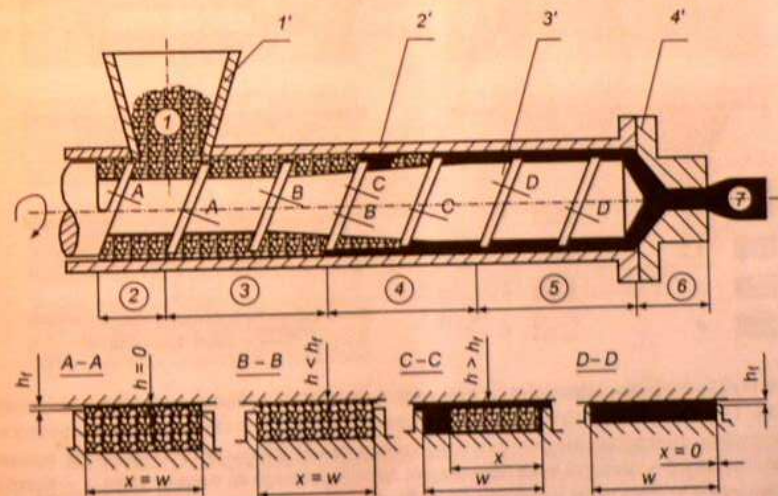
zapewnić odpowiednie uplastycznienie i wymieszanie tworzywa, ze względu na wyższą wydajność procesu i odmienną charakterystykę przepływu materiału. Wreszcie, zachodzi w tym przypadku potrzeba stosowania odmiennych ślimaków niż w rozwiązaniach z cylindrami gładkimi, z płytszą strefą zasilania i głębszą strefą dozowania.

3.1.2.3. Elementy teorii wytłaczania jednoślismakowego

W wytłaczarce jednoślismakowej można wyróżnić kilka obszarów (stref) o różnym jakościowo zachowaniu się tworzywa. W sposób modelowy przedstawiono to na rys. 3.10 (porównaj p. 3.1.1).

Strefą pierwszą jest zasobnik, przez który tworzywo w stanie stałym (w postaci granulatu lub proszku) jest dostarczane do cylindra wytłaczarki. Przemieszczanie się tworzywa w tej strefie następuje zwykle jedynie pod wpływem siły grawitacji. Drugą strefą jest początkowa część cylindra, wypełniona tworzywem w stanie stałym, które w wyniku zagęszczania przyjmuje

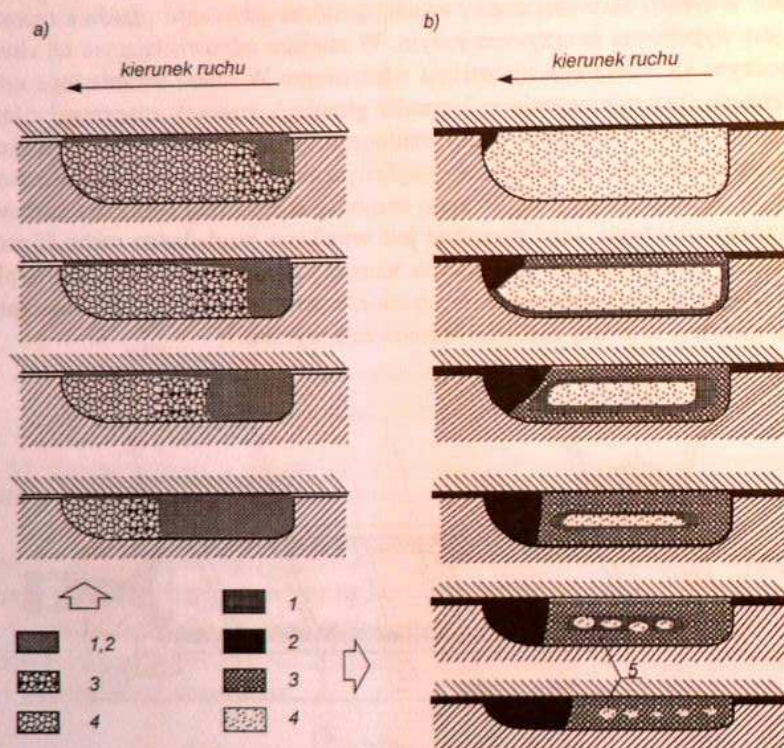
postać jednolitej warstwy. Tu przemieszczanie się tworzywa jest wynikiem względnego ruchu ślimaka i cylindra oraz tarcia między tworzywem a powierzchnią ślimaka i cylindra. Trzecia strefa procesu, tj. strefa wstępnego uplastyczniania, rozpoczyna się, gdy na powierzchni styku tworzywa z nagrzaną ścianką cylindra tworzy się cienka warstewka tworzywa uplastycznionego, której grubość powiększa się w miarę przesuwania w kierunku głowicy. Z chwilą, gdy warstewka ta osiągnie wystarczającą grubość (większą od szczeliny między wierzchołkami uzwojenia ślimaka a powierzchnią cylindra), jest zgarniana przez ściankę zwoju ślimaka. Tworzywo uplastycznione gromadzi się w tylnej, aktywnej części kanału, podczas gdy część przednia (pasywna) jest wypełniona tworzywem stałym. W miejscu odpowiadającym tej chwili rozpoczyna się strefa uplastyczniania właściwego. W miarę trwania tego uplastyczniania (przemieszczania w kierunku głowicy), wskutek znacznego ciśnienia w obszarze tworzywa uplastycznionego, zmniejszaniu ulega szerokość warstwy stałej – aż do całkowitego uplastycznienia tworzywa. Gdy szerokość warstwy stałej zmniejszy się do zera, rozpoczyna się strefa tworzywa całkowicie uplastycznionego. Jego przepływ jest wynikiem względnego ruchu ślimaka i cylindra oraz gradientu ciśnienia w kanale ślimaka wytłaczarki. Pod wpływem ciśnienia wytworzonego w cylindrze tworzywo przepływa następnie przez głowicę, w której zachodzi formowanie wyrobu.



Rys. 3.10. Schemat przebiegu procesu wytłaczania: 1' – zasobnik, 2' – cylinder, 3' – ślimak, 4' – głowica, 1 – strefa tworzywa stałego w zasobniku, 2 – strefa tworzywa stałego w cylindrze, 3 – strefa wstępnego uplastyczniania, 4 – strefa uplastyczniania właściwego, 5 – strefa tworzywa uplastycznionego w cylindrze, 6 – strefa tworzywa uplastycznionego w głowicy, 7 – strefa wytłoczonego tworzywa, x – szerokość warstwy stałego, W – szerokość kanału ślimaka, h_f – szczelina między wierzchołkami uzwojenia ślimaka a ścianką cylindra, h – grubość warstewki tworzywa uplastycznionego

Przedstawiony w powyższym modelu opis przebiegu uplastyczniania tworzywa jest słuszny w odniesieniu do materiałów wykazujących adhezję do ścianki cylindra, a więc – dla większości tworzyw. W przypadku jednak, gdy na ścianie cylindra występuje poślizg, mechanizm uplastyczniania jest odmienny. Wówczas mianowicie, uplastycznione na ścianie cylindra tworzywo nie jest zgarniane przez zwój ślimaka, lecz przepływa przez szczelinę między tym zwojem a cylindrem i gromadzi się w pasywnej części kanału.

Obydwa przypadki mechanizmu uplastyczniania przedstawiono na rys. 3.11.



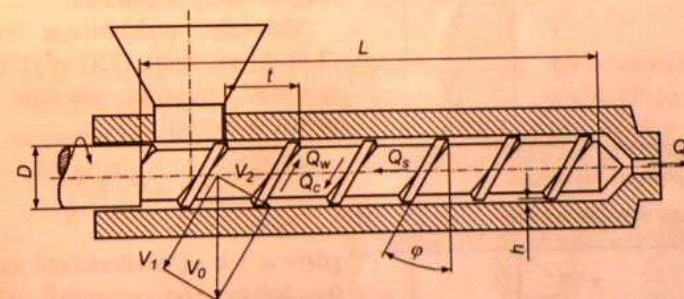
Rys. 3.11. Mechanizm uplastyczniania tworzywa: a) materiałów wykazujących adhezję do ścianki cylindra: 1 – warstewka tworzywa uplastycznionego utworzona przy ścianie cylindra, 2 – tworzywo uplastycznione gromadzące się przy aktywnej ścianie kanału (obszar ten powiększa się w miarę uplastyczniania), 3 – strefa przenikania tworzywa uplastycznionego do warstwy stałej, 4 – warstwa stała tworzywa; b) materiałów wykazujących poślizg na ścianie cylindra: 1 – warstewka tworzywa uplastycznionego, 2 – tworzywo uplastycznione gromadzące się przy pasywnej ścianie kanału, 3 – strefa przenikania, 4 – warstwa stała tworzywa, 5 – pęcherzyki powietrza

Do opisu każdego z wyróżnionych powyżej obszarów: zasobnika, ślimaka (strefy ciała stałego, strefy uplastyczniania wstępnego, strefy uplastyczniania właściwego, strefy tworzywa uplastycznionego) i głowicy potrzebne są różne,

ale wzajemnie uzupełniające się modele. Szczególnie ważne jest przy tym właściwe przedstawienie współdziałania ślimaka i głowicy, które stanowi istotę wytłaczania.

W tej pracy ograniczono się do opisu przepływu tworzywa (uplastycznionego) w strefie dozowania ślimaka, który to opis stanowi podstawę teorii wytłaczania.

Przepływ ten zachodzi w wyniku względnego ruchu ślimaka i cylindra oraz adhezji tworzywa do cylindra i ślimaka. Prędkość obwodowa ślimaka V_0 rozkłada się na dwie składowe prędkości: V_1 – w kierunku równoległym i V_2 – w kierunku prostopadłym do zwoju ślimaka (rys. 3.12). Prędkość V_1 wywołuje przepływ wleczony Q_w , który wpływa na natężenie przepływu tworzywa w wytłaczarce (wydajność wytłaczarki), natomiast prędkość V_2 wywołuje przepływ poprzeczny, który nie wpływa na natężenie przepływu, ale spełnia istotną rolę przy mieszaniu tworzywa. Przepływ wleczony nakłada się na przepływ ciśnieniowy Q_c , który jest wynikiem istnienia gradientu ciśnienia w kanale ślimaka wytłaczarki, spowodowanego oporem przepływu stawianym przez głowicę. Gradient ten może być dodatni lub ujemny, w zależności od warunków wytłaczania. Trzecim składnikiem określającym natężenie przepływu tworzywa w wytłaczarce jest przepływ przeciekowy Q_s , który zachodzi w wyniku istnienia gradientu ciśnienia w szczelinie między uzwojeniem ślimaka a ścianką cylindra. Na rys. 3.13 przedstawiono rozkład prędkości tworzywa w przepływie wleczonym i ciśnieniowym.



Rys. 3.12. Schemat przepływu tworzywa w wytłaczarce jednoślakowej (oznaczenia w tekście)

W rezultacie, natężenie przepływu tworzywa w wytłaczarce (wydajność) Q wyraża się jako

$$Q = Q_w - Q_c - Q_s \quad (3.1)$$

lub – w uproszczonej postaci, przy pominięciu przepływu przeciekowego – jako

$$Q = Q_w - Q_c \quad (3.2)$$

gdzie składowe tego natężenia – wg klasycznej, newtonowskiej teorii wytłaczania – określone są następującymi zależnościami:

$$Q_w = \frac{\pi^2 D^2 h N \sin \varphi \cos \varphi}{2} \quad (3.3)$$

$$Q_c = \frac{\pi D h^3 \sin^2 \varphi}{12 \eta} \frac{\partial p}{\partial l} \quad (3.4)$$

gdzie: D – średnica zewnętrzna ślimaka, h – głębokość kanału w strefie dozowania, N – prędkość obrotowa ślimaka, φ – kąt pochylenia linii śrubowej ślimaka, η – lepkość tworzywa, $\partial p / \partial l$ – gradient ciśnienia wzdłuż długości ślimaka.

Można przyjąć w uproszczeniu, że gradient ciśnienia w strefie dozowania jest stały, tzn. że:

$$\frac{\partial p}{\partial l} = \frac{\Delta p}{L} \quad (3.5)$$

gdzie: Δp – całkowity przyrost ciśnienia w strefie dozowania, L – długość strefy dozowania.

Wówczas, podstawiając związek (3.5) do równania (3.4) uzyskuje się zależność opisującą natężenie przepływu w postaci:

$$Q = aN - b \frac{\Delta p}{\eta} \quad (3.6)$$

gdzie a i b są wielkościami zależnymi jedynie od geometrii ślimaka i wyrażają się wzorami:

$$a = \frac{\pi^2 D^2 h \sin \varphi \cos \varphi}{2} \quad (3.7)$$

$$b = \frac{\pi D h^3 \sin^2 \varphi}{12 L} \quad (3.8)$$

Lepkość tworzywa η , występująca w równaniach (3.4) i (3.6), jest funkcją temperatury i prędkości ści-

nania w kanale ślimaka. W przybliżeniu można ją określić na podstawie tzw. charakterystycznej prędkości ścinania, która wyraża się wzorem

$$\dot{\gamma}_c = \frac{V_c}{h} \quad (3.9)$$

gdzie: $\dot{\gamma}_c$ – charakterystyczna prędkość ścinania, $V_c = \pi D N$ – prędkość obwodowa ślimaka, h – głębokość kanału ślimaka.

Równanie (3.6), w układzie współrzędnych: objętościowe natężenie przepływu – ciśnienie przedstawia linię prostą o ujemnym współczynniku kątowym, która stanowi charakterystykę danego ślimaka (rys. 3.14).

Przepływ tworzywa w głowicy wytłaczarskiej zachodzi pod wpływem ciśnienia wytworzonego w układzie uplastyczniającym wytłaczarki. Ciśnienie to musi być na tyle duże, aby zostały pokonane opory przepływu stawiane przez głowicę. Całkowity spadek ciśnienia w głowicy wytłaczarskiej jest sumą spadków ciśnienia w jej elementach składowych (o określonym kształcie przekroju poprzecznego kanału).

Natężenie przepływu ciśnieniowego można określić na podstawie znanego równania Hagena-Poiseuille'a, które dla cieczy newtonowskiej ma postać:

$$Q = K \frac{\Delta p}{\eta} \quad (3.10)$$

gdzie: Q – objętościowe natężenie przepływu tworzywa, Δp – różnica ciśnienia wywołująca przepływ, η – lepkość tworzywa, K – wielkość charakteryzująca geometrię kanału przepływu, tzw. przewodność kanału, która – przykładowo – dla kanału o przekroju kołowym ma postać:

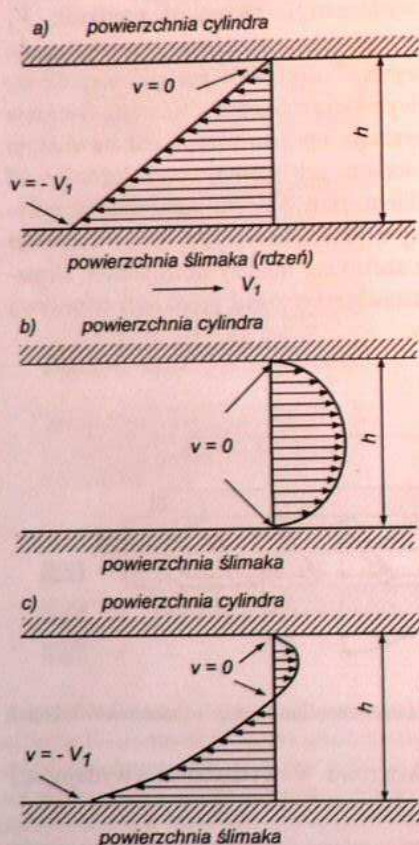
$$K = \frac{\pi R^4}{8 L} \quad (3.11)$$

a dla kanału o przekroju prostokątnym – postać:

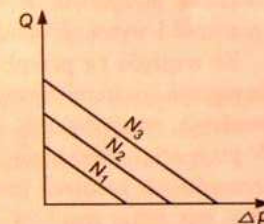
$$K = \frac{W H^3}{12 L} \quad (3.12)$$

gdzie: K – przewodność kanału (odwrotność oporności kanału), R , W , H , L – promień, szerokość, wysokość i długość kanału.

Warto zwrócić uwagę, że wzór (3.12) można z pewnym przybliżeniem zastosować do obliczania przewodności kanału pierścieniowego, charakteryzowanego promieniem zewnętrznym R_z i promieniem wewnętrznym R_w . Wówczas, szerokość takiego kanału jest równa: $W = \pi(R_z + R_w)$, natomiast grubość $H = R_z - R_w$.



Rys. 3.13. Rozkład prędkości tworzywa w kanale ślimaka w przekroju wzdłużnym: a) przepływ wleczony, b) przepływ ciśnieniowy, c) przepływ wypadkowy; v – prędkość tworzywa, V_1 – składowa prędkości obwodowej ślimaka równoległa do zwoju, h – głębokość kanału



Rys. 3.14. Charakterystyka ślimaka dla różnych wartości jego prędkości obrotowej N ($N_3 > N_2 > N_1$)

Lepkość tworzywa η występująca w równaniu (3.10) jest funkcją temperatury i prędkości ścinania w rozpatrywanym kanale przepływu, a dokładniej – prędkości ścinania na ścianie tego kanału. Prędkość ta, dla kanału o przekroju kołowym wyraża się wzorem

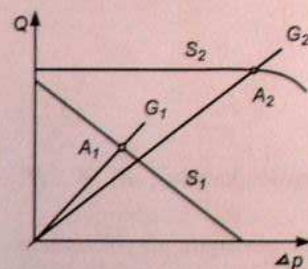
$$\dot{\gamma} = -\frac{4Q}{\pi R^3} \quad (3.13)$$

natomiast dla kanału o przekroju prostokątnym – zależnością

$$\dot{\gamma} = \frac{6Q}{WH^2} \quad (3.14)$$

gdzie: $\dot{\gamma}$ – prędkość ścinania na ścianie kanału przepływu, Q – objętościowe natężenie przepływu, R – promień kanału o przekroju kołowym, W , H – szerokość i wysokość kanału o przekroju prostokątnym.

Ze względu na przepływ tworzywa, głowicę można traktować jako zespół szeregowo (czasami równoległe) połączonych kanałów o określonym kształcie przekroju poprzecznego, a więc o określonej przewodności (lub oporności). W przypadku połączenia szeregowego kanałów, natężenie przepływu w poszczególnych kanałach jest stałe, natomiast całkowity spadek ciśnienia w głowicy jest sumą spadków ciśnienia w tych kanałach. Wówczas też oporność całkowita głowicy (odwrotność przewodności) jest równa sumie oporności poszczególnych kanałów przepływu. Natomiast w przypadku połączenia równoległego kanałów, całkowite natężenie przepływu tworzywa w głowicy jest sumą składowych tego natężenia, zaś spadek ciśnienia jest jednakowy we wszystkich kanałach. Wtedy, przewodność całkowita głowicy (odwrotność oporności) jest równa sumie przewodności poszczególnych kanałów. Jak widzimy, zastosowanie znajduje tutaj prosta analogia prądowa, wg której: natężenie przepływu tworzywa odpowiada natężeniu prądu, opór i przewodność kanału odpowiadają oporowi i przewodności elektrycznej, i wreszcie, ciśnienie (spadek ciśnienia) odpowiada napięciu (spadkowi napięcia).



Rys. 3.15. Charakterystyka procesu wytłaczania: Q – objętościowe natężenie przepływu tworzywa, Δp – ciśnienie, S – charakterystyka ślimaka, G – charakterystyka głowicy, A – punkt pracy wylączarki; indeksy: 1 – układ klasyczny z gładkim cylindrem, 2 – układ z cylindrem rowkowanym

Równanie (3.10) w układzie współrzędnych: objętościowe natężenie przepływu–ciśnienie przedstawia linię prostą o dodatnim współczynniku kątowym, która stanowi charakterystykę danej głowicy. Charakterystyka ta tworzy z cha-

rakterystyką ślimaka charakterystykę procesu wytłaczania. Punkt przecięcia charakterystyki ślimaka S_1 i charakterystyki głowicy G_1 wyznacza tzw. punkt pracy wylączarki A_1 (rys. 3.15), który określa natężenie przepływu i ciśnienie w procesie wytłaczania – dla określonego tworzywa, ślimaka i głowicy oraz określonych warunków procesu (prędkości obrotowej ślimaka, temperatury).

Przedstawiona powyżej analiza dotyczy wytłaczania tradycyjnego, z gładkim cylindrem, i nie ma zastosowania do opisu wytłaczania z cylindrem rowkowanym. W tym drugim przypadku bowiem, jak już wspomniano (p. 3.1.2.2), wydajność wylączarki jest wyznaczana przez strefę zasilania i nie zależy od ciśnienia tworzywa (oporu przepływu) w głowicy. Charakterystykę takiej wylączarki przedstawiono na rys. 3.15; punkt przecięcia charakterystyk ślimaka S_2 i głowicy G_2 wyznacza tutaj punkt pracy A_2 .

Wydajność wylączarki z cylindrem rowkowanym można w przybliżeniu określić na podstawie zależności

$$Q = \pi(D - h_1)(t - e)N\eta_v \quad (3.15)$$

gdzie: Q – objętościowe natężenie przepływu tworzywa, D – średnica cylindra, t – skok zwoju ślimaka, e – szerokość zwoju, N – prędkość obrotowa ślimaka, $\eta_v = 0,6 \div 0,8$ – objętościowa sprawność transportowania.

3.1.3. WYTŁACZANIE DWUŚLIMAKOWE

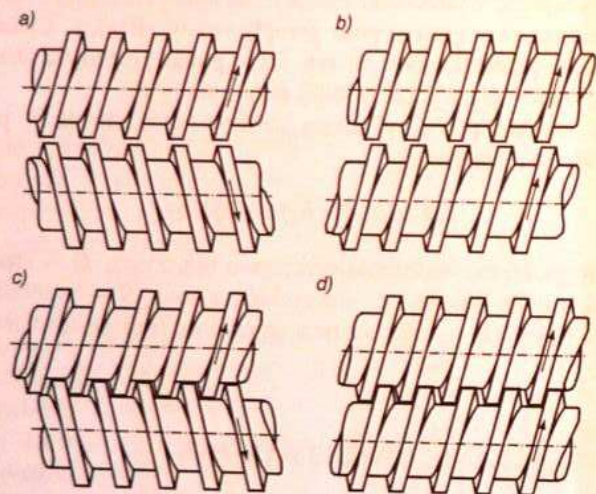
Układy dwuślimakowe wytłaczania (rys. 3.16) dzieli się ze względu na kierunek obrotów ślimaków na:

- współbieżne, ślimaki obracają się wówczas w tym samym kierunku;
 - przeciwbieżne; ślimaki obracają się w przeciwnych kierunkach;
- natomiast ze względu na stopień zazębienia zwojów na:
- zazębiające się,
 - nie zazębiające się.

Wylączarki dwuślimakowe znajdują zastosowanie głównie do wytłaczania profili z materiałów wrażliwych termicznie, np. PVC, oraz do realizowania specjalnych operacji technologicznych, np. mieszania tworzyw, odgazowywania czy wytłaczania reaktywnego.

Wytłaczanie profili odbywa się zwykle za pomocą wylączarek przeciwbieżnych, szczególnie się zazębiających. Maszyny te, w porównaniu do wylączarek jednoślimakowych, zapewniają lepsze zasilanie tworzywem (zwłaszcza w przypadku materiałów w postaci sproszkowanej i materiałów o właściwościach poślizgowych) oraz krótszy i mniej zróżnicowany czas pobytu cząstek tworzywa w maszynie. Specjalne operacje technologiczne (mieszanie tworzyw, odgazowywanie i wytłaczanie reaktywne) odbywa się za pomocą wylączarek współbieżnych, także szczególnie się zazębiających.

Mechanizm transportu tworzywa w wylaczarkach dwuslimakowych jest odmienny niz w wylaczarkach jednoslimakowych i w duzym stopniu zalezy od stopnia zazebienia sie slimakow. Ogolnie mozna powiedziec, ze im szczelniesze jest zazebienie, tym bardziej rozni sie ten mechanizm. Wylaczarki nie zazebiajace sie przypominaja pod tym wzgledem wylaczarki jednoslimakowe i dlatego tez nie maja tak dobrych zdolnosci transportowania, jak przy zazebieniu szczelnym. Warto dodac, ze wzrod wylaczarek nie zazebiajacych sie praktyczne znaczenie maja jedynie wylaczarki przeciwbiezne.

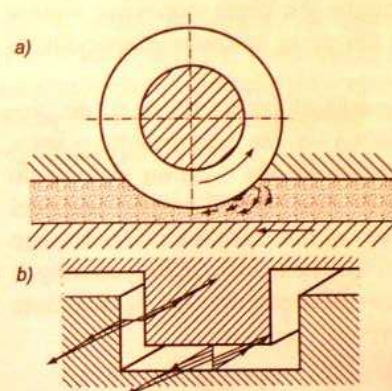


Rys. 3.16. Odmiany ukladow dwuslimakowych wylaczarek: a) przeciwbiezny bez zazebienia, b) wspolbiezny bez zazebienia, c) przeciwbiezny z zazebiajacych sie zwojami, d) wspolbiezny z zazebiajacych sie zwojami

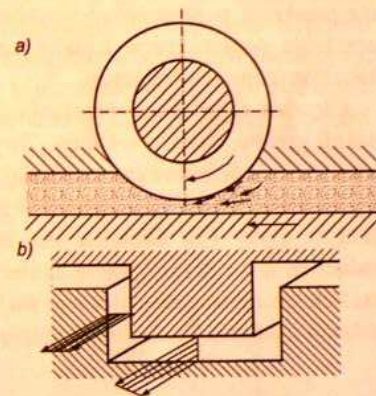
W wylaczarkach wspolbieznych podczas kazdego obrotu slimakow tworzywo jest przemieszczane z kanalu jednego slimaka do kanalu drugiego slimaka. Przeplyw tworzywa ma charakter wleczony, tak ze przypomina pod tym wzgledem przeplyw w wylaczarce jednoslimakowej, jednak podczas przemieszczania miedzy slimakami tworzywo przebywa dluzsza droge i jest poddawane wiekszemu scinaniu. Ruch tworzywa w szczelinach miedzyzwojowych slimakow wspolbieznych przedstawiono na rys. 3.17. Jak wida, intensywne scinanie jest wywolane duza roznicza predkosci miedzy powierzchniami zazebiajacych sie zwojow slimaka.

W wylaczarkach przeciwbieznych mechanizm transportu tworzywa jest calkowicie inny niz w wylaczarkach jednoslimakowych. Kazdy segment slimaka tworzy tutaj zamknietą komore w ksztalcie zwichrowanej litery C, która przemieszcza tworzywo od zasobnika do konca slimaka – bez przeplywu do komor sasiednich. W tym przypadku nie wystepuje przeplyw wleczony, tak ze nieznaczne jest tylko rozpraszanie energii wewnetrznej. Regula jest, ze tworzywo jest dozowane do wylaczarki w taki sposob, ze komory slimaka sa jedynie czesciowo wypełnione. W przeciwnym wypadku bowiem, przy zapeł-

nieniu komor, tworzywo wplywaloby w szczeline miedzy slimakami. To z kolei prowadziloby do nadmiernego wzrostu cisnienia i szybkiego zuzycia slimaka i cylindra. Taki mechanizm transportu powoduje, ze uplastycznianie tworzywa jest powolne, a mieszanie slabe. Dlatego tez stosuje sie czesto dodatkowe sekcje miesajace. Ruch tworzywa w szczelinach miedzyzwojowych slimakow przeciwbieznych przedstawiono na rys. 3.18. Jak wida, nie wystepuja tutaj duze roznicze predkosci miedzy powierzchniami zazebiajacych sie zwojow slimaka, tak ze naprężenia scinajace sa duzo mniejsze niz w ukladow wspolbieznych.



Rys. 3.17. Ruch tworzywa w szczelinie miedzyzwojowej ukladow wspolbieznych: a) przekroj poprzeczny w stosunku do osi slimaka, b) przekroj wzdluzny



Rys. 3.18. Ruch tworzywa w szczelinie miedzyzwojowej ukladow przeciwbieznych: a) przekroj poprzeczny, b) przekroj wzdluzny

Wylaczarki dwuslimakowe obok zalet maja istotne wady. Sa drogie, zlozone konstrukcyjnie i trudne do wykonania.

3.1.4. GLOWICE WYLACZARSKIE

Zadaniem glowic wylaczarskich jest nadanie przetwarzanemu materialowi zadanego ksztaltu, przy zapewnieniu jednorodnosci termicznej i mechanicznej w calęj objętości tworzywa, oraz wytworzenie odpowiedniego oporu przeplywu (spadku cisnienia) umozliwiajacego realizację procesu wylaczania.

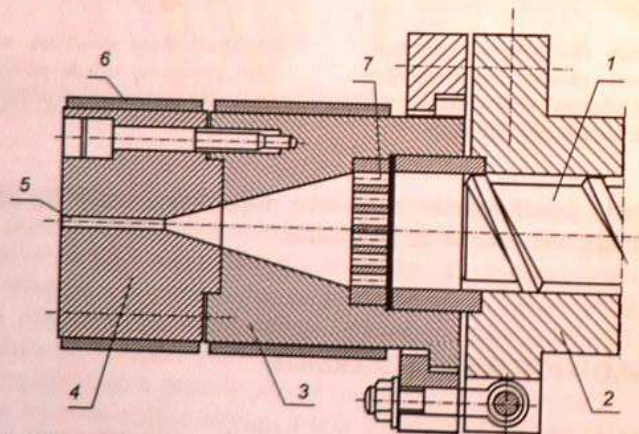
Głowice można podzielić, w zależności od ich przeznaczenia, np. na: głowice do wylaczania profili pelnych, pustych lub otwartych; glowice do wylaczania rur, folii, plyt, wlokien; a takze – glowice do powlekania drutu, do granulowania itp.

Głowice można też podzielić wg geometrii elementu formującego wyrób (tj. przekroju poprzecznego kanału u wylotu głowicy). Mianowicie, wyróżnia się następujące typy głowic:

- głowice o kołowym przekroju części formującej,
- głowice do profili płaskich,
- głowice do profili pierścieniowych,
- głowice do profili innego typu.

Podstawowe zadanie głowicy, czyli przekształcenie pierścieniowego strumienia tworzywa wypływającego z wylotówki w strumień o żądanym kształcie przekroju poprzecznego wyrobu, realizowane jest przez stopniową zmianę przekroju poprzecznego kanału przepływu lub przez stosowanie specjalnych kanałów rozprowadzających.

Głowice o kołowym przekroju części formującej stosuje się m.in. do produkcji prętów, żyłek i włókien. Zwykle składają się one z elementów o kołowym lub pierścieniowym przekroju poprzecznym kanału. Typową głowicę do wytłaczania prętów przedstawiono na rys. 3.19. Formowanie wyrobu zachodzi tutaj w dyszy (5). Głowica jest wyposażona w filtr tworzywa (7), którego zadaniem jest zatrzymywanie zanieczyszczeń i niecałkowicie uplastycznionych cząstek tworzywa, zmniejszanie ruchu śrubowego tworzywa oraz ograniczanie pulsacji ciśnienia i natężenia przepływu.

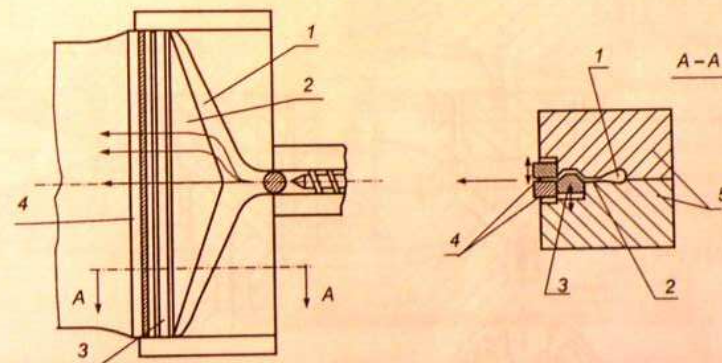


Rys. 3.19. Głowica do wytłaczania prętów: 1 – ślimak, 2 – cylinder, 3 – korpus głowicy, 4 – końcówka głowicy, 5 – dysza, 6 – grzejniki, 7 – filtr

Głowice do profili płaskich, tzw. głowice szczelinowe płaskie, są stosowane do wytłaczania folii i płyt. Do tej grupy głowic można też zaliczyć głowice do powlekania, np. papieru, tkanin itp. W przypadku głowic szczelinowych płaskich zachodzi potrzeba przekształcenia pierścieniowego strumienia tworzywa wypływającego z wylotówki w strumień o przekroju prostokątnym. Reali-

zowane to jest za pomocą odpowiednio skonstruowanego kanału rozprowadzającego (rozdzielacza). Zadaniem tego rozdzielacza jest równomierne rozprowadzenie tworzywa wzdłuż szerokości głowicy, tak aby prędkość jego wypływu była niezależna od położenia, a jego właściwości – jednolite.

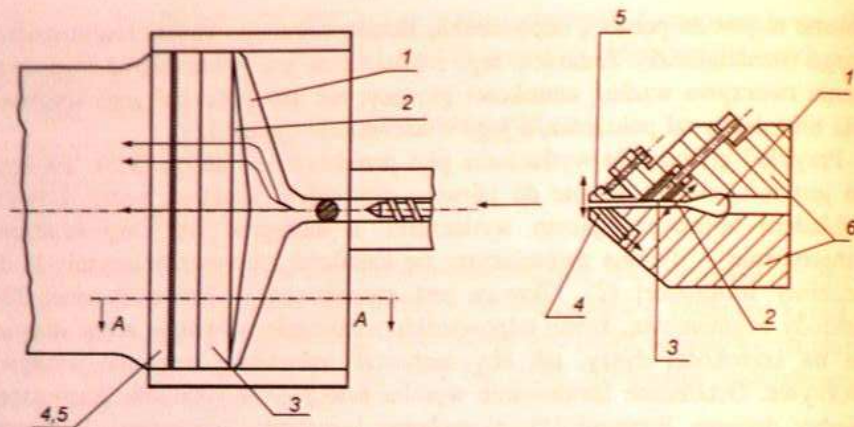
Przykład głowicy do wytłaczania płyt przedstawiono na rys. 3.20. Tworzywo jest tutaj doprowadzane do głowicy centralnym kanałem, współosiowym z układem uplastyczniającym wytłaczarki, a następnie jest rozprowadzane symetrycznie – dwoma zwężającymi się kanałami rozprowadzającymi (1) do szczeliny formującej (2). Głowica jest wyposażona w listwę dławiącą (3), niekiedy segmentową, której odpowiednie ustawienie wywołuje różne dławienie na szerokości dyszy, tak aby zachować jednakowe natężenie wypływu tworzywa. Ostateczne formowanie wyrobu następuje w szczelinie formującej, między dwiema listwami (4): nieruchomą i ruchomą (nastawną). Położenie listwy nastawnej jest regulowane śrubami w celu uzyskania żądanej grubości wytłaczanego wyrobu.



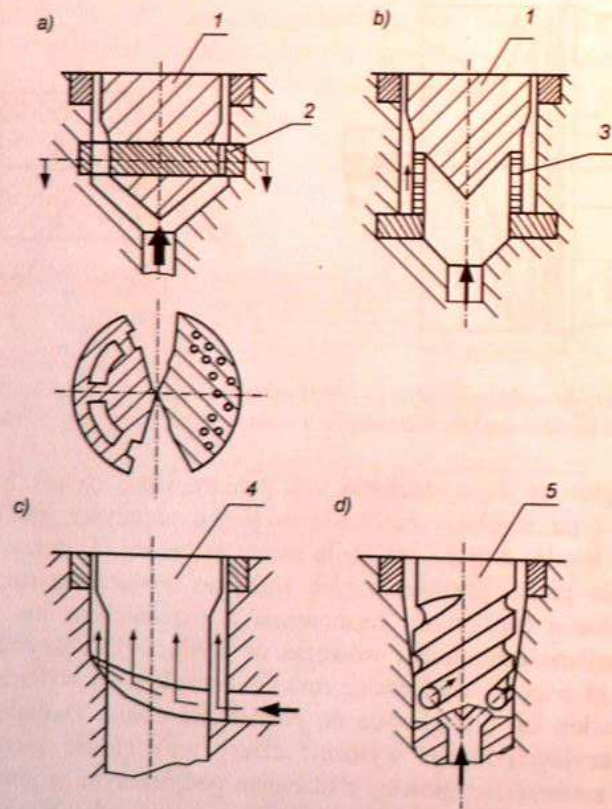
Rys. 3.20. Głowica do wytłaczania płyt: 1 – kanał rozprowadzający, 2 – szczelina formująca, 3 – listwa dławiąca o lokalnie ustalonym dławieniu, 4 – listwy dyszy formującej, 5 – korpus głowicy

Przykład głowicy do wytłaczania folii przedstawiono na rys. 3.21. W głowicach tego typu regulacja natężenia wypływu tworzywa jest realizowana zwykle przez lokalną zmianę położenia listwy nastawnej (5) dyszy formującej.

Głowice do profili pierścieniowych służą do wytłaczania rur, folii rurowych, powlekania (np. drutu), formowania z rozdmuchem itp. Głowice te mogą być zasilane centralnie i wówczas oś wytłaczarki pokrywa się z osią głowicy (np. głowice do wytłaczania rur) lub bocznie – oś wytłaczarki tworzy z głowicą pewien kąt (np. głowice do powlekania drutu). Ogólnie, ze względów konstrukcyjnych można wyróżnić cztery typy głowic pierścieniowych (rys. 3.22), a mianowicie: głowice z rdzeniem podpieranym za pomocą wspornika, głowice z rdzeniem podpieranym za pomocą tulei sitowej, głowice z rdzeniem rozprowadzającym (rozdzielaczem) – zasilane bocznie, głowice z rozdzielaczem śrubowym.

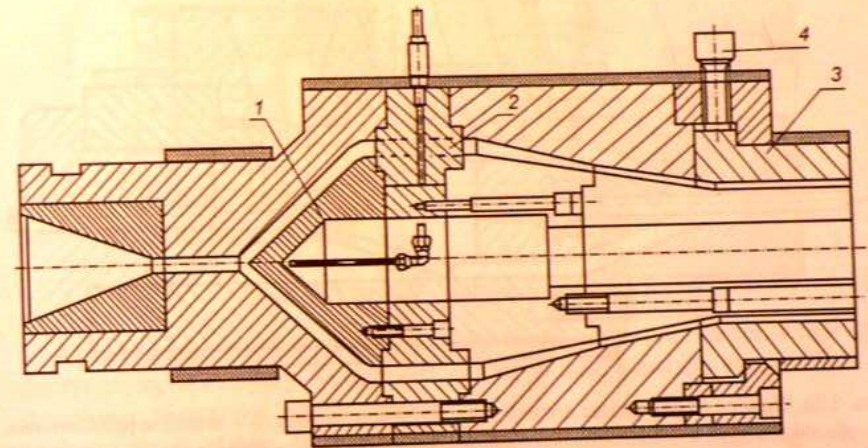


Rys. 3.21. Głowica do wytłaczania folii: 1 – kanał rozprowadzający, 2 – szczelina formująca, 3 – listwa dławiąca o lokalnie ustalonym dławieniu, 4 – listwa dyszy formującej, 5 – listwa dyszy formującej o lokalnie ustalonym dławieniu, 6 – korpus głowicy



Rys. 3.22. Głowice pierścieniowe: a) ze wspornikiem rdzenia, b) z tuleją sitową, c) z rdzeniem rozprowadzającym, d) z rozdzielaczem śrubowym; 1 – rdzeń, 2 – wspornik, 3 – tuleja sitowa, 4 – rdzeń rozprowadzający, 5 – rozdzielacz śrubowy

Typową głowicę do wytłaczania rur (z rdzeniem podpieranym za pomocą wspornika) przedstawiono na rys. 3.23. Strumień tworzywa – doprowadzany centralnie kanałem cylindrycznym – jest przekształcany w strumień pierścieniowy za pomocą stożkowego rdzenia (1). Rdzeń ten jest umocowany w głowicy za pomocą wspornika (2). Żebra wspornika są odpowiednio ukształtowane, aby zapewnić równomierny przepływ tworzywa. Współosiowość rdzenia (1) i pierścienia formującego (3) ustala się za pomocą śrub centrujących (4). Wadą tego typu głowic jest tworzenie się śladów linii płynięcia tworzywa na wytłaczanej rurze, powodowanych rozdzielaniem (przez żebra wspornika) i łączeniem się strumienia tworzywa. Tej wady pozbawione są głowice z rozdzielaczem śrubowym (rys. 3.22d).



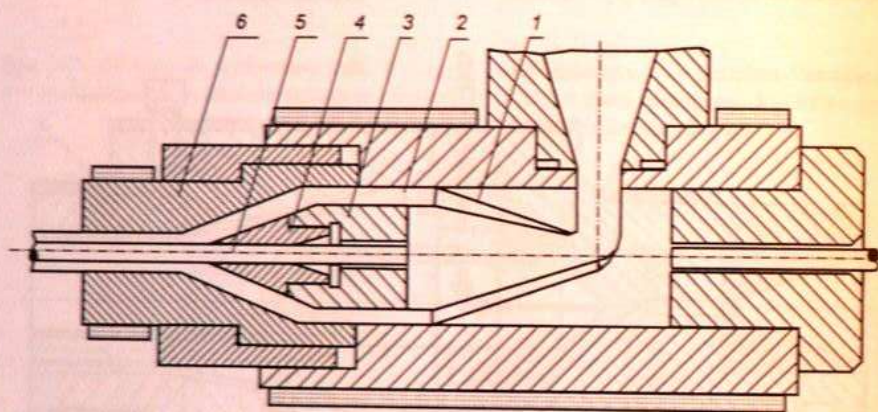
Rys. 3.23. Głowica do wytłaczania rur: 1 – rdzeń, 2 – wspornik rdzenia, 3 – pierścień formujący, 4 – śruby centrujące ustnik

Do głowic do wytłaczania profili pierścieniowych zaliczyć również można głowice do powlekania drutu (rys. 3.24). W głowicach tego typu tworzywo przepływa wokół drążonego rdzenia, który spełnia jednocześnie rolę prowadzenia powlekanego drutu.

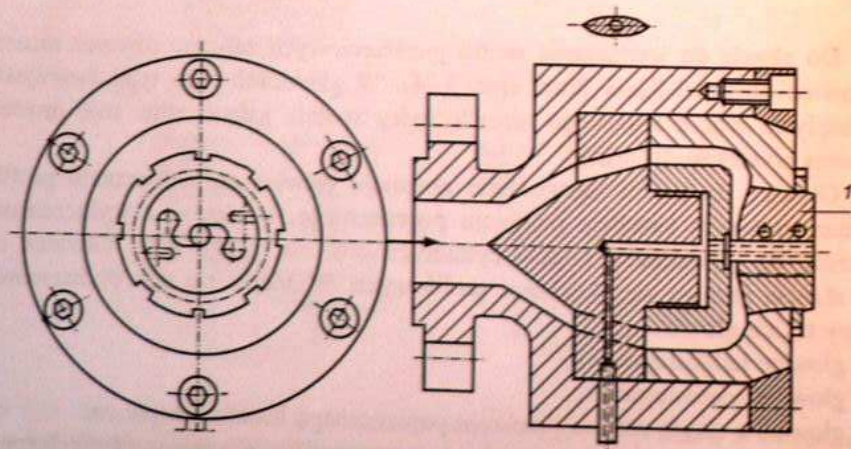
Głowice do profili innego typu obejmują głowice do wytłaczania profili o nieregularnym kształcie przekroju poprzecznego, a więc – z wyłączeniem głowic do wytłaczania prętów cylindrycznych, rur, płyt i folii. Głowice te w skrócie nazywa się głowicami profilowymi. Wyróżnia się trzy podstawowe typy takich głowic:

- głowice jednostopniowe,
 - głowice wielostopniowe,
 - głowice z ciągłą zmianą przekroju poprzecznego kanału przepływu.
- W głowicach jednostopniowych formowanie profilu zachodzi w płycie formującej (1) o określonym kształcie przekroju poprzecznego kanału formującego

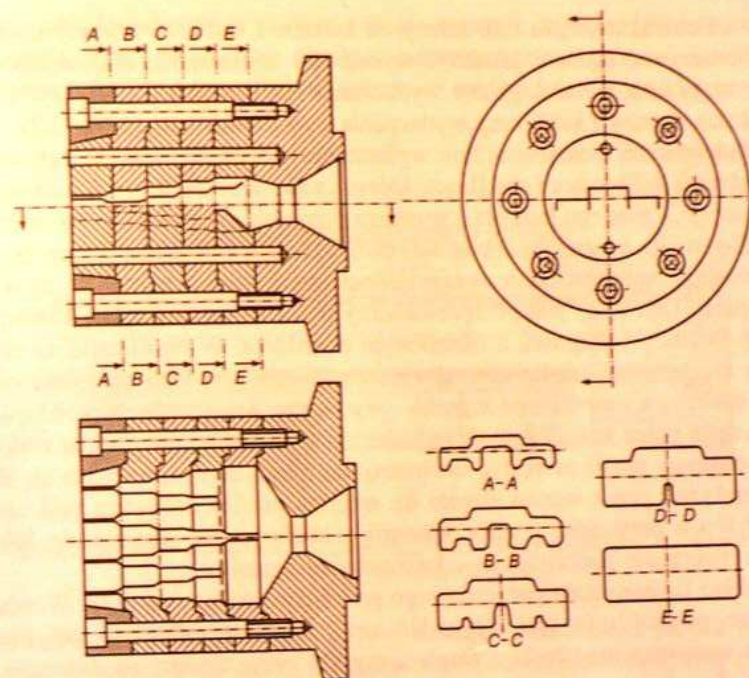
(rys. 3.25). Następuje tutaj nagła zmiana przekroju kanału przepływu, co nie jest korzystne ze względu na możliwość miejscowego zalegania tworzywa i w konsekwencji – jego destrukcji. Głowice wielostopniowe (rys. 3.26) składają się z kilku płyt formujących, które tworzą kanał przepływu o stopniowo zmieniającym się przekroju poprzecznym. Rozwiązanie takie zmniejsza zaleganie tworzywa, jednak nie w pełni je eliminuje, gdyż może ono występować w miejscach styku płyt formujących. Z tego punktu widzenia najlepszym rozwiązaniem są głowice trzeciego typu, tzn. głowice z ciągłą zmianą przekroju poprzecznego kanału przepływu, w których nie ma miejsc potencjalnego zalegania tworzywa.



Rys. 3.24. Głowica do powlekania drutu: 1 – kanał rozprowadzający, 2 – szczelina pierścieniowa, 3 – rdzeń z otworem, 4 – końcówka rdzenia prowadząca drut, 5 – powlekany przewód, 6 – pierścień formujący głowicę

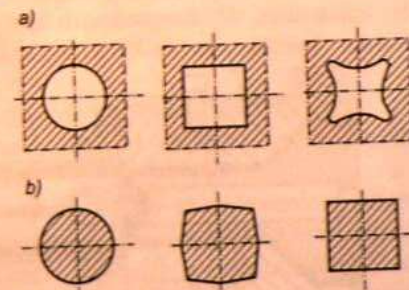


Rys. 3.25. Głowica profilowa jednostopniowa: 1 – płyta formująca



Rys. 3.26. Głowica profilowa wielostopniowa

Kształtowanie wyrobu zachodzi w głowicy w jej ostatnim elemencie geometrycznym, tzw. dyszy wylączarskiej. Na skutek zjawiska rozszerzania się strumienia tworzywa wypływającego z dyszy (tzw. efektu Barusa, który stanowi cechą cieczy lepkosprężystych) jego przekrój poprzeczny nie jest równy przekrojowi wylotu dyszy (rys. 3.27). Z tego powodu zachodzi potrzeba odpowiedniej korekty przekroju poprzecznego dyszy. Korekta ta – jak dotąd – jest zwykle realizowana doświadczalnie, chociaż stosowane są również niekiedy komputerowe obliczenia symulacyjne.



Rys. 3.27. Przekrój poprzeczny: a) dyszy wylączarskiej, b) wytłaczanego tworzywa

3.1.5. LINIE TECHNOLOGICZNE WYTŁACZANIA

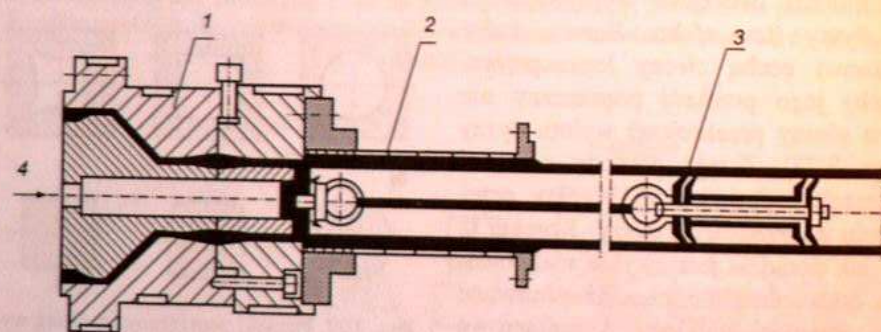
Jak już wspomniano, proces wytłaczania jest realizowany w linii technologicznej wytłaczania, w skład której wchodzi wylączarka, głowica, urządzenia kalibrujące i chłodzące oraz urządzenia odbierające i odcinające (rys. 3.1).

Budowa i charakterystyka linii zależy od kształtu i wymiarów wyrobu, właściwości tworzywa, żądanej jakości i wydajności wytłaczania. Największe znaczenie mają linie technologiczne wytłaczania rur i innych profili, płyt i folii, powlekania drutów i kabli oraz wytłaczania z rozdmuchiwaniami (p. 3.2).

Podstawowymi elementami linii wytłaczania – obok wytłaczarki i głowicy – są urządzenia kalibrujące i chłodzące, których zadaniem jest nadanie i utrwalenie ostatecznego, żadanego kształtu i wymiaru przekroju poprzecznego wyrobu.

Kalibrowanie można podzielić na zewnętrzne i wewnętrzne, z tym że podstawowe znaczenie ma kalibrowanie zewnętrzne. Polega ono na tym, że wytłaczany profil (np. rura) jest przeprowadzany przez chłodzoną tuleję kalibrującą o danej średnicy i długości, z określonym dociskiem. W tym czasie na skutek różnicy temperatury między tworzywem a powierzchnią tulei następuje ochładzanie tworzywa i utrwalenie kształtu i wymiarów zewnętrznych profilu, które są określone przez kształt i wymiary tulei. Aby proces ten przebiegał efektywnie, wytłaczany profil musi być dociskany do tulei, co przeprowadza się dwoma sposobami: przez wprowadzenie do wnętrza profilu powietrza pod ciśnieniem (tylko w przypadku profilu pustego) – kalibrowanie ciśnieniowe, lub też przez wytworzenie podciśnienia – kalibrowanie próżniowe.

Przykład kalibrowania ciśnieniowego przedstawiono na rys. 3.28. Wewnątrz wytłaczanego profilu (w tym przypadku rury), w pewnej odległości od głowicy (1), jest umieszczony korek uszczelniający (3) przyczepiony na łańcuchu do głowicy. Sprężone powietrze (4) jest doprowadzane przez trzpień formujący w przestrzeń między głowicą i korkiem, dociskając zewnętrzną ściankę rury do wewnętrznej powierzchni tulei kalibrującej (2). W trakcie kalibracji ustalona zostaje średnica zewnętrzna rury.

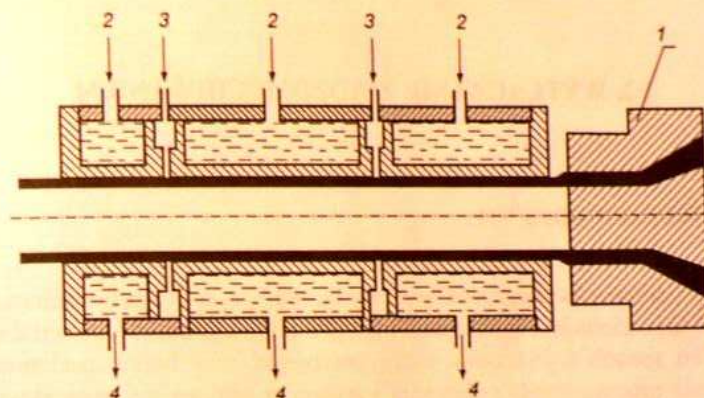


Rys. 3.28. Kalibrowanie ciśnieniowe: 1 – głowica, 2 – tuleja kalibrująca, 3 – korek uszczelniający, 4 – sprężone powietrze

Przykład kalibrowania próżniowego przedstawiono na rys. 3.29. Docisk zewnętrznej powierzchni rury do kalibratora jest w tym przypadku realizowany przez wytworzenie podciśnienia na tej powierzchni.

W czasie kalibrowania wytłaczany profil jest chłodzony, w sposób pośredni lub bezpośredni. Zwykle stosuje się także chłodzenie dodatkowe w urządzeniach

chłodzących. Urządzenia te stanowią długie wanny z doprowadzeniem i odprowadzeniem wody chłodzącej, często z zamontowanymi rolkami, po których przesuwa się wytłaczany profil, zanurzony w wodzie lub nią spryskiwany.



Rys. 3.29. Kalibrowanie próżniowe: 1 – głowica, 2 – wlot wody chłodzącej, 3 – doprowadzenie próżni, 4 – wylot wody chłodzącej

Urządzenia odbierające służą do wyciągania wytłaczanego profilu z głowicy, przeprowadzania go przez kalibrator i urządzenie chłodzące oraz podawania do następnych elementów linii technologicznej (urządzenia tnącego i składającego). Cechą charakterystyczną urządzenia odbierającego jest możliwość ciągłej regulacji prędkości przesuwania wytłaczanego profilu, dostosowywanej do prędkości kalibrowania i chłodzenia. Profil jest przesuwany przy wykorzystaniu siły tarcia między nim a elementami napędowymi. W zależności od kształtu tych elementów, urządzenia odbierające dzieli się na: rolkowe, taśmowe i gąsienicowe.

Linie technologiczne do wytłaczania innych wyrobów, np. folii, płyt, do powlekania drutów i kabli różnią się rozwiązaniami szczegółowymi, jednak istota zachodzących procesów jest podobna.

Warto na koniec zwrócić uwagę na wytłaczanie z granulowaniem, które stanowi etap przygotowania materiału wejściowego do procesów przetwórstwa. Większość tworzyw termoplastycznych i niektóre tworzywa utwardzalne, jako materiały wejściowe do tych procesów powinny być w stanie stałym i mieć postać granulek. Ponieważ jednak polimery uzyskuje się w procesach polimeryzacji w postaci proszku, zachodzi potrzeba ich odpowiedniego zgranulowania w ostatniej fazie wytwarzania. Niekiedy dodaje się wówczas również do czystego polimeru (produktu polimeryzacji) odpowiednie dodatki modyfikujące własności tego polimeru (patrz rozdz. 2). Wytłaczanie z granulowaniem przeprowadza się w liniach technologicznych, które dzielą się na linie do wytłaczania z granulowaniem na zimno (w stanie stałym) i z granulowaniem na ciepło (w stanie plastycznym). Istota granulacji polega na wytłaczaniu pęku (np. kilkunastu) żyłek tworzywa i następnie cięciu tych żyłek na granulki.

3.2. WYTŁACZANIE Z ROZDMUCHIWANIEM

3.2.1. WPROWADZENIE

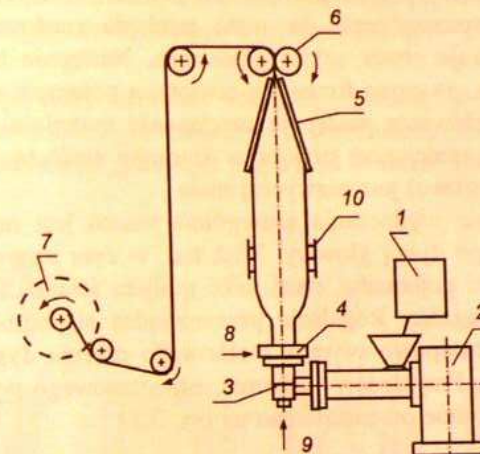
Ważną odmianę wytłaczania jest wytłaczanie z rozdmuchiwaniami, które polega na odpowiednim, w zależności od potrzeb, rozdmuchaniu wytłaczanego profilu. Ten sposób wytłaczania może przebiegać przy braku mechanicznego ograniczenia procesu rozdmuchiwania i wówczas nazywa się swobodnym, lub przy ograniczeniu rozdmuchiwania, czyli tzw. rozdmuchiwaniami nieswobodnym – w formie. W wyniku rozdmuchiwania swobodnego otrzymuje się folie rurowe z tworzyw termoplastycznych, poddawane zwykle następnie innym procesom przetwórstwa lub obróbki, np. rozcinaniu, zgrzewaniu i drukowaniu. W wyniku rozdmuchiwania w formie natomiast uzyskuje się głównie pojemniki z tworzyw termoplastycznych, następnie zwykle drukowane.

3.2.2. WYTŁACZANIE Z ROZDMUCHIWANIEM SWOBODNYM

Proces technologiczny wytłaczania z rozdmuchiwaniami swobodnym polega na wytłoczeniu rury cienkościennej i natychmiastowym jej rozdmuchaniu strumieniem powietrza o niedużym ciśnieniu, a następnie wyciągnięciu za pomocą urządzenia odbierającego. Proces ten może być realizowany przez wytłaczanie pionowo w górę, pionowo w dół i poziomo, jednak najczęściej spotyka się wytłaczanie z rozdmuchiwaniami pionowo w górę (rys. 3.30). W każdym z tych przypadków linia technologiczna wytłaczania składa się ze zbiornika tworzywa (1), wytłaczarki (2), głowicy (3) – zwykle z rozdzielaczem spiralnym (rys. 3.22d), urządzenia nadmuchiującego chłodzącego (4), urządzenia spłaszczającego (5), urządzenia odbierającego (6) i urządzenia nawijającego (7). Powietrze rozdmuchujące (9) wprowadza się do wnętrza wytłaczanej rury, która jest wyciągana przez walce urządzenia odbierającego (6) i spłaszczana między płytami ślizgowymi urządzenia spłaszczającego (5). Rurę tę nazywa się często rękawem folii. Niekiedy dodatkowo stosowane jest urządzenie kalibrujące (10), które ustala średnicę wytłaczanego rękawa.

W czasie rozdmuchiwania zachodzi przede wszystkim rozciąganie w kierunku poprzecznym, natomiast podczas wyciągania – rozciąganie w kierunku

wzdłużnym. Nie zachodzi tu jednak znacząca orientacja, tak że otrzymywana w ten sposób folia uważana jest za nieorientowaną.



Rys. 3.30. Schemat wytłaczania z rozdmuchiwaniami pionowo w górę: 1 – zbiornik tworzywa, 2 – wytłaczarka, 3 – głowica, 4 – urządzenie nadmuchiujące chłodzące, 5 – urządzenie spłaszczające, 6 – urządzenie odbierające, 7 – urządzenie nawijające, 8 – dopływ powietrza chłodzącego, 9 – doprowadzenie powietrza rozdmuchującego, 10 – urządzenie prowadzące (kalibrujące)

Proces wytłaczania z rozdmuchiwaniami swobodnym jest charakteryzowany dwoma parametrami: stopniem rozciągania folii w kierunku wzdłużnym (określany jako stosunek prędkości odbierania folii do prędkości wypływu tworzywa z głowicy wytłaczarki) oraz stopniem rozciągania w kierunku poprzecznym, czyli stopniem rozdmuchania (definiowanym jako stosunek średnicy rękawa folii do średnicy otworu wylotowego dyszy głowicy).

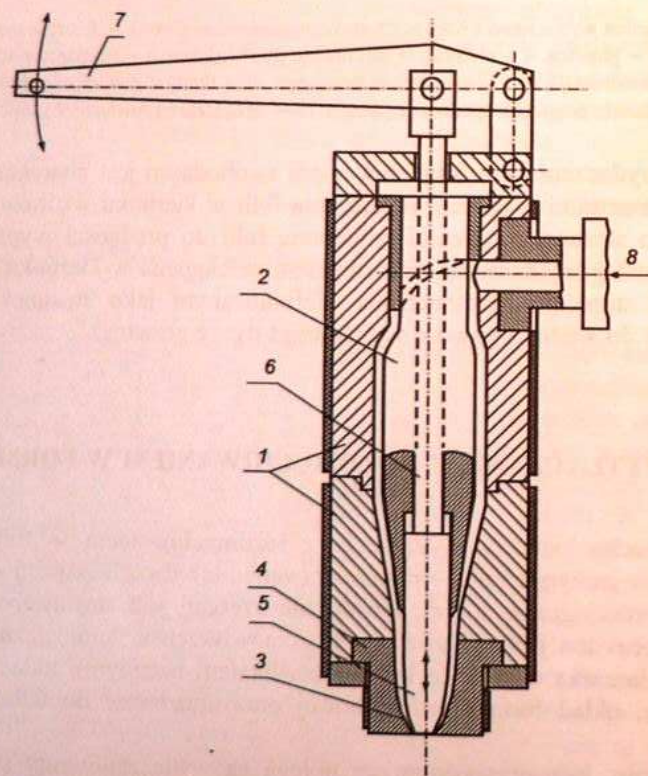
3.2.3. WYTŁACZANIE Z ROZDMUCHIWANIEM W FORMIE

Proces technologiczny wytłaczania z rozdmuchiwaniami w formie może przebiegać w jednym etapie – rozdmuchiwania, lub dwóch etapach – rozdmuchiwania i rozciągania, z tym, że obecnie częściej jest stosowany ten drugi sposób. Proces ten jest realizowany na stanowiskach technologicznych, które tworzą wytłaczarka z głowicą kątową (zasilaniem bocznym), układ odcinająco-podający, układ formy rozdmuchowej oraz urządzenie do odbierania pojemników.

Tradycyjny, jednoetapowy proces polega na wytłaczaniu rury (węża tworzywa) bezpośrednio do gniazda formy rozdmuchowej o kształcie i wymiarach odpowiadających produkowanemu pojemnikowi. Wąż ten jest następnie na swoich końcach zgrzewany oraz obcinany podczas zamykania formy, a po jej

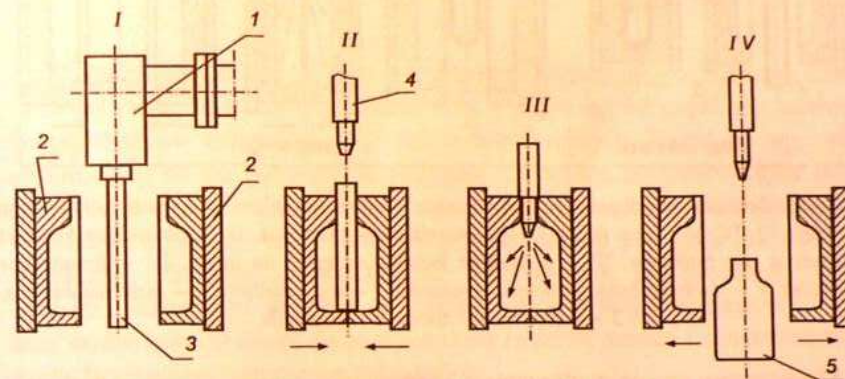
zamknięciu rozdmuchiwany, aż do przyjęcia kształtu i wymiarów gniazda formującego. Zgrzewanie i odcinanie węża następuje za pomocą specjalnie ukształtowanych elementów na powierzchni podziału formy. Rozdmuchiwanie następuje przez wprowadzenie do węża trzpienia rozdmuchującego, który jednocześnie kalibruje otwór szyjki pojemnika. Następnie tworzywo zostaje w formie zestawione, po czym formę się otwiera, a pojemnik usuwa z gniazda. W czasie rozdmuchiwania następuje rozciąganie materiału w kierunku poprzecznym oraz, w mniejszym stopniu, w kierunku wzdłużnym, ale orientacja molekularna (dwuosiowa) jest zazwyczaj mała.

Przy tej metodzie wytłaczania szczególnie ważna jest regulacja grubości węża opuszczającego dyszę głowicy. Wąż ten, w celu zapewnienia jednolitej grubości ścianki pojemnika, musi mieć grubszą ściankę tam, gdzie następuje większe rozciąganie. Regulację przeprowadza się automatycznie przez odpowiedni ruch postępowo-zwrotny stożkowego rdzenia dyszy głowicy wytłaczarki (rys. 3.31). Przykładowy schemat jednoetapowego wytłaczania z rozdmuchiowaniem w formie przedstawiono na rys. 3.32.



Rys. 3.31. Głowica do wytłaczania z rozdmuchiowaniem: 1 – korpus głowicy, 2 – korpus rdzenia, 3 – szczelina formująca, 4 – dysza, 5 – rdzeń z końcówką stożkową, 6 – trzpień rdzenia, 7 – ramię mechanizmu ruchu rdzenia, 8 – doprowadzenie tworzywa

- Proces dwuetapowy, tzw. rozdmuchiwanie z rozciąganiem, polega na:
- wytłaczaniu z rozdmuchiowaniem węża tworzywa, podobnie jak w odmianie tradycyjnej, ale w celu otrzymania nie gotowego pojemnika, lecz kształtki wstępnej o mniejszych wymiarach i grubszej ściance – formowanie wstępne, oraz
 - ustaleniu temperatury kształtki wstępnej i następnie jej rozdmuchaniu z ewentualnym wzdłużnym rozciąganiem mechanicznym (za pomocą trzpienia) w celu otrzymania gotowego pojemnika – formowanie zasadnicze.

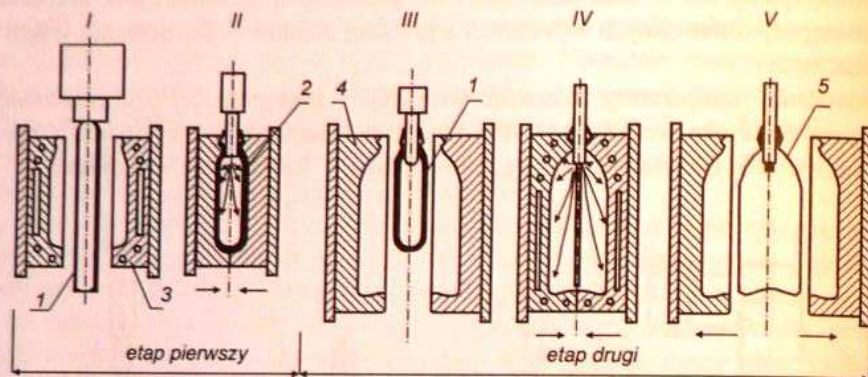


Rys. 3.32. Schemat jednoetapowego wytłaczania z rozdmuchiowaniem w formie: I – podawanie węża tworzywa, II – zamknięcie formy i odcięcie węża, III – wprowadzenie trzpienia rozdmuchującego i rozdmuchiwanie, IV – otwarcie formy i usunięcie pojemnika; 1 – głowica, 2 – forma, 3 – wąż tworzywa, 4 – trzpień rozdmuchujący, 5 – pojemnik

Przy tej metodzie wytłaczania, w czasie rozdmuchiwania następuje znaczne rozciąganie tworzywa w kierunku poprzecznym oraz w kierunku wzdłużnym, tak że występuje duża dwuosiowa orientacja molekularna. Szczególnie ważne jest przy tym ustalenie odpowiedniej temperatury kształtki wstępnej (bliskiej temperaturze zeszklenia lub temperaturze krystalizacji tworzywa) i rozpoczęcie w tym momencie formowania zasadniczego, gdyż wówczas może zajść w tworzywie wspomniana orientacja, powodująca podniesienie jakości pojemników.

Wąż tworzywa opuszczający dyszę głowicy jest jednakowej grubości, a równomierną grubość ścianek pojemnika uzyskuje się przez zmienną odkształcalność poszczególnych stref, wydzielonych wzdłuż długości pojemnika, wywołowaną różną ich temperaturą. Najniższa temperatura powinna być w strefie szyjki, gdzie musi być zachowana duża grubość ścianki (celem zapewnienia poprawnego kontaktu z nakrętką w czasie użytkowania), oraz w strefie dna, gdzie rozciąganie jest najbardziej intensywne (tutaj jednak temperatura musi być odpowiednio wysoka, aby nastąpiło zgrzanie dna powstającego węża). Temperatura w pozostałych strefach powinna być prawie jednakowa, gdyż jednakowe są tam odkształcenia tworzywa i taka sama grubość ścianki

pojemnika. Przykładowy schemat dwuetapowego wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie przedstawiono na rys. 3.33.



Rys. 3.33. Schemat dwuetapowego wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie: I, II – etap pierwszy; III, IV, V – etap drugi; 1 – podawanie węża tworzywa, II – formowanie kształtki wstępnej w tzw. preformie, III – podawanie kształtki wstępnej do formy, IV – formowanie pojemnika, V – otwarcie formy i usunięcie pojemnika; 1 – wąż tworzywa, 2 – kształtka wstępna, 3 – preforma, 4 – forma, 5 – pojemnik

Dwuetapowy proces wytłaczania z rozdmuchiwaniem w formie jest charakteryzowany trzema parametrami: stopniem rozciągania w kierunku wzdłużnym (określanym jako stosunek długości pojemnika do długości kształtki wstępnej), stopniem rozciągania w kierunku poprzecznym (wyznaczanym przez stosunek średnicy pojemnika do średnicy kształtki) oraz stopniem orientacji makrocząsteczkowej (definiowanym umownie jako stosunek grubości ścianki pojemnika do grubości ścianki kształtki).

Istotnym ograniczeniem metody formowania z rozciąganiem jest to, że praktycznie może być ona stosowana jedynie do wyrobów osiowo-symetrycznych, ewentualnie wyrobów o owalnym kształcie przekroju poprzecznego.

3.3. WTRYSKIWANIE

Wtryskiwanie jest podstawowym procesem wytwarzania z tworzyw sztucznych gotowych wyrobów o masie od 0,01 g do 70 kg; od części dla mikroniki do pojemników transportowych i kabin telefonicznych. Został on wprawdzie zastosowany po raz pierwszy na początku XX wieku, do przetwórstwa pierwszych termoplastycznych tworzyw sztucznych, lecz rzeczywisty rozwój tej technologii rozpoczął się z chwilą wprowadzenia do produkcji przemysłowej wtryskarek ślimakowych (ok. 1960 r.). Wtryskiwanie jest procesem cyklicznym przeznaczonym głównie do przetwórstwa tworzyw termoplastycznych, lecz stosowanym również do przetwarzania tworzyw termo- i chemoutwardzalnych. Do jego podstawowych zalet należą:

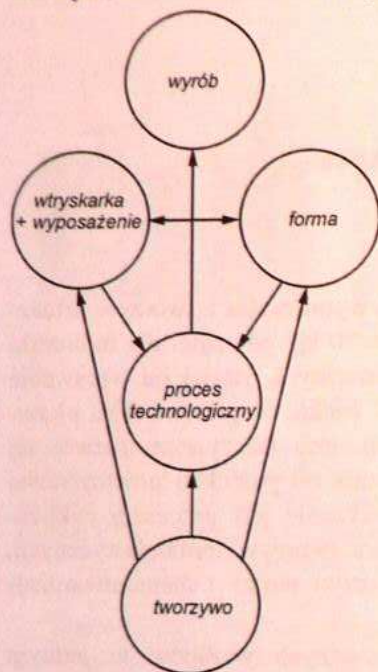
- wytwarzanie nawet najbardziej skomplikowanych wyrobów w jednym procesie technologicznym;
- mały bądź żaden udział obróbek wykańczających;
- wysoka jakość i powtarzalność własności;
- możliwość pełnego zautomatyzowania, komputerowego sterowania i kontroli procesu;
- w porównaniu z obróbką metali, znaczne zmniejszenie liczby operacji technologicznych, mniejsze zużycie energii bezpośredniej i wody, niewielka pracochłonność, niska emisja związków szkodliwych dla otoczenia.

Wadami tej technologii są:

- wysoki koszt maszyn (wtryskarek) i niejednokrotnie dorównujący mu koszt oprzyrządowania (form), powodujący wydłużenie czasu amortyzacji i wysokie koszty uruchomienia produkcji;
- konieczność wysokich kwalifikacji pracowników nadzoru technicznego, którzy muszą znać specyfikę przetwórstwa tworzyw sztucznych;
- konieczność zachowania wąskich tolerancji parametrów przetwórstwa;
- długi czas przygotowania produkcji za względu na pracochłonność wykonawstwa form wtryskowych.

Ze względu na specyficzne właściwości tworzyw sztucznych, wtryskiwanie jest bardzo złożonym procesem technologicznym; w odróżnieniu od pozornie

pokrewnego procesu odlewania ciśnieniowego metali nie jest procesem mechanicznym, lecz mechaniczno-fizycznym. W procesie wtryskiwania uzyskuje się



Rys. 3.34. Współzależność czynników wpływających na jakość wypraski oraz ekonomiczność jej wytwarzania

wypraskę charakteryzującą się nie tylko określonym kształtem, lecz także specyficzną strukturą, wynikającą ze sposobu płynięcia uplastycznionego tworzywa w formie oraz przebiegu jego krzepnięcia. Ponieważ procesy te zachodzą w formie wtryskowej, konstruktor tego narzędzia musi uwzględniać, oprócz zagadnień typowo mechanicznych, również zagadnienia związane z fizycznym charakterem przemian tworzywa. Skonstruowanie racjonalnie pracującej formy wymaga równocześnie od konstruktora gruntownej znajomości możliwości technicznych wtryskarki, ponieważ jest to maszyna o wyjątkowo bogatych możliwościach, zapewnionych przez jej wyposażenie i liczne programy pracy.

Zespół współzależności i czynników wpływających na jakość wyrobu oraz ekonomiczność jego wytwarzania przedstawiono na rys. 3.34.

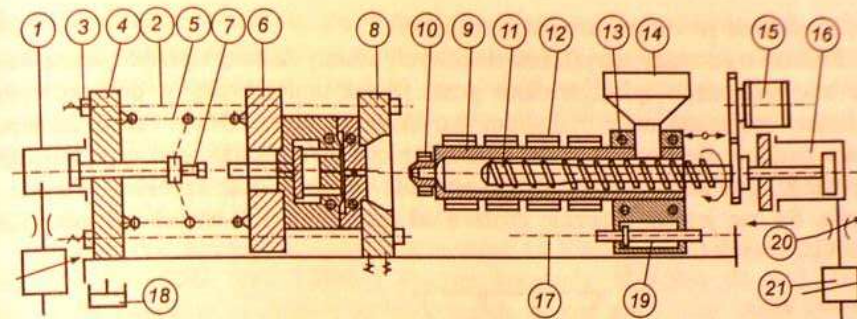
3.3.1. BUDOWA WTRYSKAREK

Współczesne wtryskarki są skomplikowanymi, wielofunkcyjnymi maszynami do przetwórstwa tworzyw sztucznych. Ogólna budowa wszystkich ich typów (rys. 3.35) jest podobna, ponieważ składają się one z pełniących tę samą rolę zespołów funkcjonalnych (rys. 3.36). W zależności od rodzaju przetwarzanego tworzywa, sposobu pracy, rodzaju formy itp., są dostosowywane do wymogów poszczególnych wariantów technologii w sposób konstrukcyjny bądź przez zastosowanie specjalnego wyposażenia technologicznego.

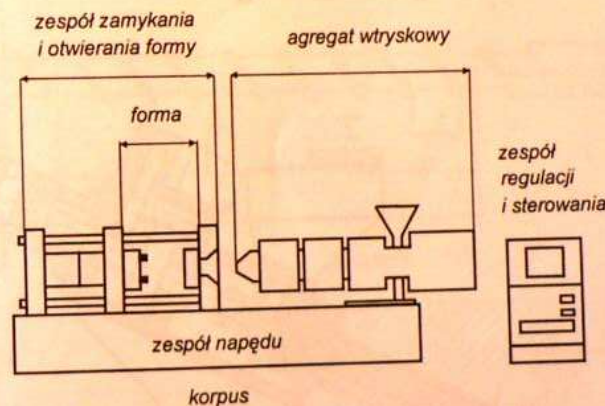
3.3.1.1. Zespoły funkcjonalne

Zespół uplastyczniania i wtryskiwania

W zależności od potrzeb produkcyjnych jest on wymienny; zwany jest agregatem wtryskowym. Rodzaj budowy tego zespołu określa również nazwę całej wtryskarki.



Rys. 3.35. Schemat konstrukcyjny wtryskarki ślimakowej z podstawowymi zespołami: 1 – silownik napędu stołu, 2 – kolumny prowadzące stół, 3 – nakrętki do nastawiania wysokości formy, 4 – stół tylny nieruchomy przestawny, 5 – zespół kolanowo-dźwigniowy, 6 – stół ruchomy, 7 – zderzak wtryskarki, 8 – stół przedni nieruchomy, 9 – cylinder wtryskowy, 10 – dysza wtryskarki, 11 – ślimak, 12 – grzejniki, 13 – chłodzenie strefy zasypowej cylindra, 14 – lej zasypowy, 15 – silnik napędu ruchu obrotowego ślimaka, 16 – silownik przesuwu ślimaka, 17 – prowadnice agregatu wtryskowego, 18 – zbiornik oleju układu hydraulicznego, 19 – silownik przesuwu cylindra, 20 – dławik, 21 – regulator ciśnienia oleju układu hydraulicznego

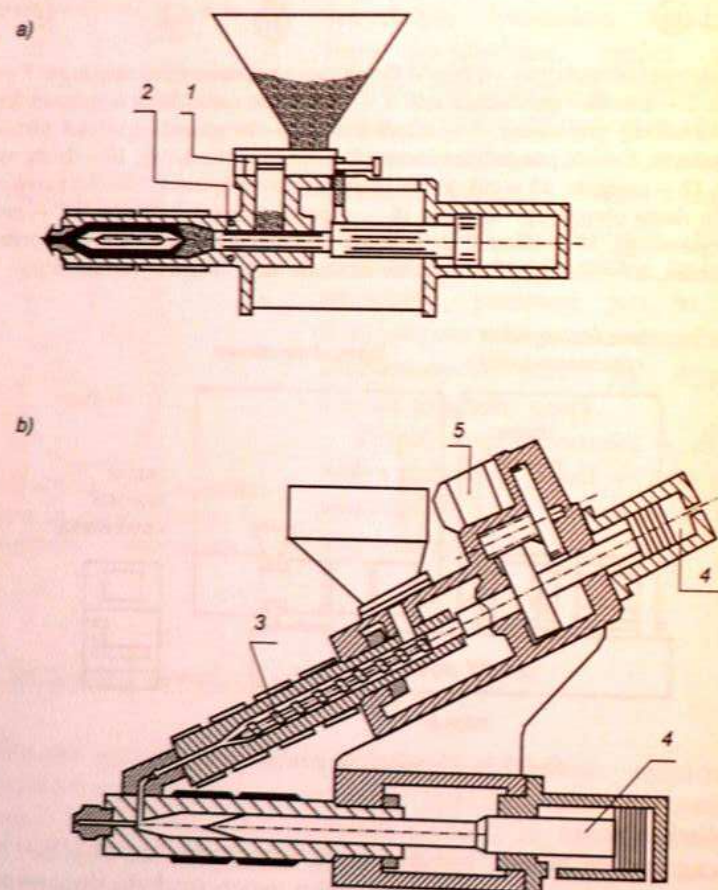


Rys. 3.36. Zespoły funkcjonalne wtryskarki

Wtryskarki tłokowe

W początkowym okresie konstruowania wtryskarek, do ok. 1960 r., był to ogrzewany grubościenny cylinder, w którym tworzywo było dozowane i przemieszczane przez prosty tłok napędzany silownikiem hydraulicznym (rys. 3.37a). Tworzywo przeciskane między grubym cylindrem a wewnętrznym rozdzielaczem, zwanym torpedą, było ogrzewane i uplastyczniane. Duże straty ciśnienia, brak wymieszania, a tym samym i homogenizacji tworzyw czułych termicznie, trudności dozowania, brak możliwości przetwarzania tworzyw większej niż 500 g/cykl, spowodowało wycofanie tych maszyn z produkcji przemysłowej. Rozwiązanie to jest nadal stosowane tylko w małych wtryskarkach laboratoryjnych, chociaż wtryskarki tłokowe można jeszcze spotkać w bardzo prymitywnych warsztatach rzemieślniczych.

Podstawowe wady wtryskarek tłokowych zostały usunięte przez zastosowanie tzw. wstępnego uplastyczniania przez ślimak umieszczony w dodatkowym cylindrze połączonym z cylindrem wtryskowym (rys. 3.37b). Przed czołem tłoka znajduje się tworzywo już uplastycznione. Wtryskarki tego typu stosuje się wtedy, gdy konieczne są bardzo wysokie ciśnienie oraz szybkość wtryskiwania. Są one jednak znacznie droższe od standardowych wtryskarek obecnie produkowanych.



Rys. 3.37. Rozwój systemów uplastyczniania we wtryskarkach: a) agregat tłokowy, b) agregat tłokowy ze wstępnym uplastycznianiem ślimakowym; 1 – dozownik tłoczkowy, 2 – tłok wtryskowy, 3 – ślimak uplastyczniający, 4 – siłownik hydrauliczny, 5 – silnik napędu ślimaka

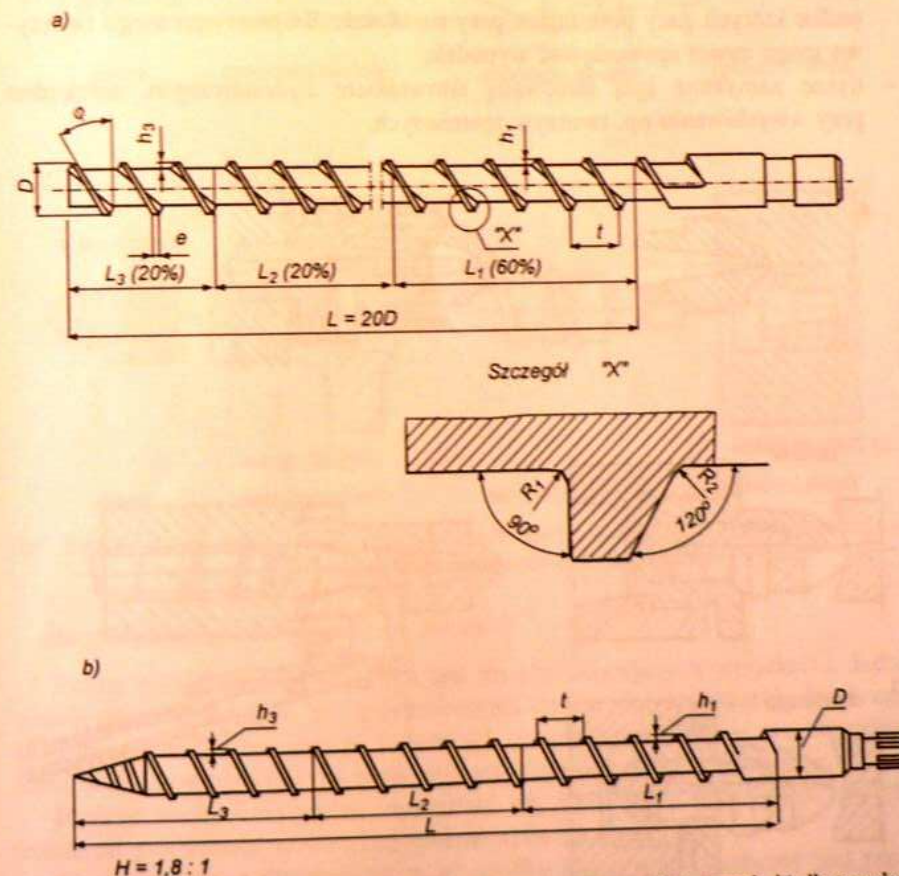
Wtryskarki ślimakowe

Obecnie przy pojemności wtryskiwania powyżej 20 cm^3 stosowane są wyłącznie zespoły ślimakowe, w których obracający się ślimak uplastycznia tworzywo, a wtryskiwanie odbywa się pod wpływem jego przesuwu powodowanego przez siłownik hydrauliczny. Przebieg uplastyczniania tworzywa jest podobny do występującego przy wytłaczaniu, z tą różnicą, że ślimak obraca-

jąc się gromadzi tworzywo przed swoim czołem, a równocześnie pod wpływem ciśnienia tego tworzywa przesuwają się do tyłu. Osiągnięcie określonego miejsca drogi wycofania oznacza, że została uplastyczniona odpowiednia porcja tworzywa i następuje wyłączenie obrotów ślimaka. Dopuszczalna droga wycofania ślimaka wynosi $4D$ (D – średnica ślimaka).

W zależności od potrzeb stosuje się ślimaki uplastyczniające o różnej geometrii wykonane z różnych materiałów.

Do tworzyw termoplastycznych stosowane są ślimaki trójstrefowe o długości $L = 20 + 25D$ (rys. 3.38a) i stopniu sprężania $H = 2:1$ do $3:1$, przy czym dla tworzyw częściowo krystalicznych stosuje się krótką strefę sprężania i dolny zakres wartości H . Tworzywa o silnym działaniu korodującym (np. PVC) lub ściernym (np. PA z włóknem szklanym) wymagają stosowania na ślimaki i cylindry pokryć ze specjalnych stopów. W normalnym wykonaniu ślimaki są utwardzane powierzchniowo przez azotowanie plazmowe.

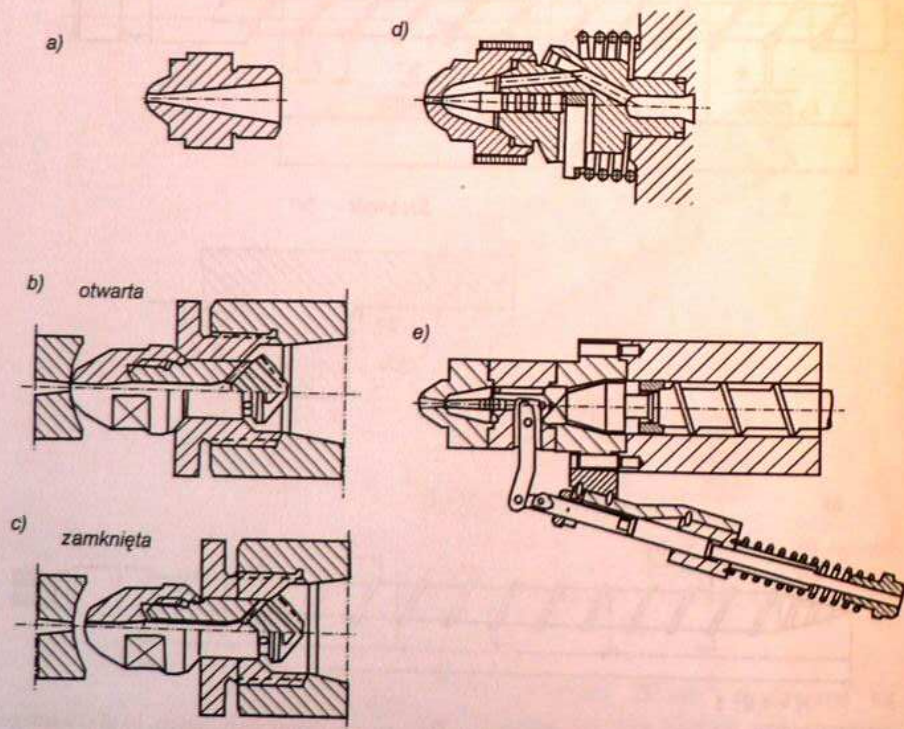


Rys. 3.38. Geometria ślimaka trójstrefowego: a) dla tworzyw termoplastycznych, b) dla twardego PVC ze specjalną końcówką; L_1 – długość strefy zasilania, L_2 – długość strefy sprężania, L_3 – długość strefy dozowania, $h_1/h_3 = H$ – stopień sprężania ślimaka, D – średnica ślimaka, t – skok zwoju ślimaka, e – grubość zwoju, φ – kat pochylenia zwoju (linii śrubowej ślimaka)

Większość ślimaków zakończona jest końcówką tworzącą zawór zwrotny zabezpieczający przed cofaniem tworzywa wzdłuż zwojów w czasie fazy wtryskiwania i docisku. Tworzywa o niskiej odporności termicznej, jak np. PVC, nie powinny zalegać w przedniej części cylindra – w tych przypadkach stosuje się końcówki stożkowe pasujące do stożka, którym zakończony jest otwór cylindra wtryskowego (rys. 3.38b).

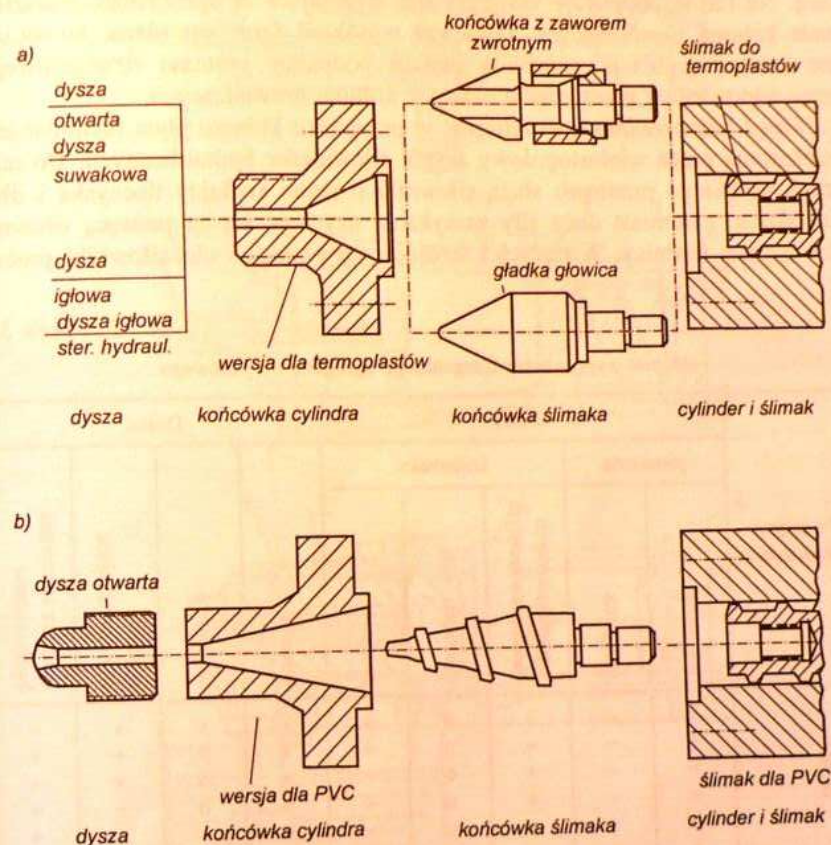
Zależnie od lepkości i odporności tworzywa na ścieranie stosowane są różnego typu dysze wkręcane w końcówkę cylindra (rys. 3.39):

- dysze otwarte zapewniające najlepszy przepływ, lecz równocześnie nie zabezpieczające przed niekontrolowanym wyciekami tworzywa;
- dysze zamykane tłoczkowe zabezpieczające przed wyciekami tworzywa z cylindra, lecz powodujące zaleganie tworzywa i duże straty ciśnienia;
- dysze zamykane igłą działającą na zasadzie zaworu bezpieczeństwa; szczególnie zalecane do wtryskiwania tworzyw, takich jak PA, POM, w przypadku których gazy powstające przy rozkładzie źle przetwarzanego tworzywa mogą nawet spowodować wypadek;
- dysze zamykane igłą sterowaną siłownikiem hydraulicznym, niezbędne przy wtryskiwaniu np. tworzyw spienianych.



Rys. 3.39. Dysze wtryskarki: a) otwarta, b, c) tłoczkowa otwierana przez nacisk formy, d) igłowa zamykana sprężyną, e) igłowa sterowana siłownikiem

Ogólne zasady kompletowania omówionego wyposażenia integralnego agregatu wtryskowego wyjaśniono na rys. 3.40, natomiast dane szczegółowe podano w tabl. 3.1.



Rys. 3.40. Kompletowanie końcówek ślimaków z zakończeniami cylindrów, zaworami zwrotnymi i dyszami: a) do tworzyw termoplastycznych, b) do twardego PVC

Zespół zamykania i otwierania formy

Forma wtryskowa zamocowana jest do płyt mocujących wtryskarki. Jedna z tych płyt, nieruchoma, jest przymocowana do korpusu wtryskarki, druga zaś, ruchoma, przesuwana jest po kolumnach prowadzących lub – we wtryskarkach bezkolumnowych – po prowadnicach umieszczonych na korpusie.

Funkcje ruchu i wywarcia niezbędnej siły zamykania realizowane są (zależnie od producenta) przez niżej podane systemy napędowe.

Napęd kolanowo-dźwigniowy, w przypadku którego stół ruchomy jest przesuwany przez system kolanowo-dźwigniowy, najczęściej 5-punktowy (przegubowy), uruchamiany pojedynczym siłownikiem hydraulicznym (rys. 3.41a, b). System ten charakteryzuje duża szybkość ruchu oraz niewielki wydatek oleju

(energii). Jednakże do wywarcia pełnej siły zamykania konieczne jest pełne rozprostowanie dźwigni z jednoczesnym pełnym zamknięciem formy – suma wymiarów długości dźwigni i wysokości formy musi więc być wielkością stałą. Na formę oddziałuje wówczas siła wynikająca ze sprężystego odkształcenia kolumn prowadzących. Ponieważ wysokość form jest różna, konieczna jest zawsze regulacja położenia punktu podparcia systemu dźwigniowego przez odpowiednie przesunięcie nakrętek kolumn prowadzących.

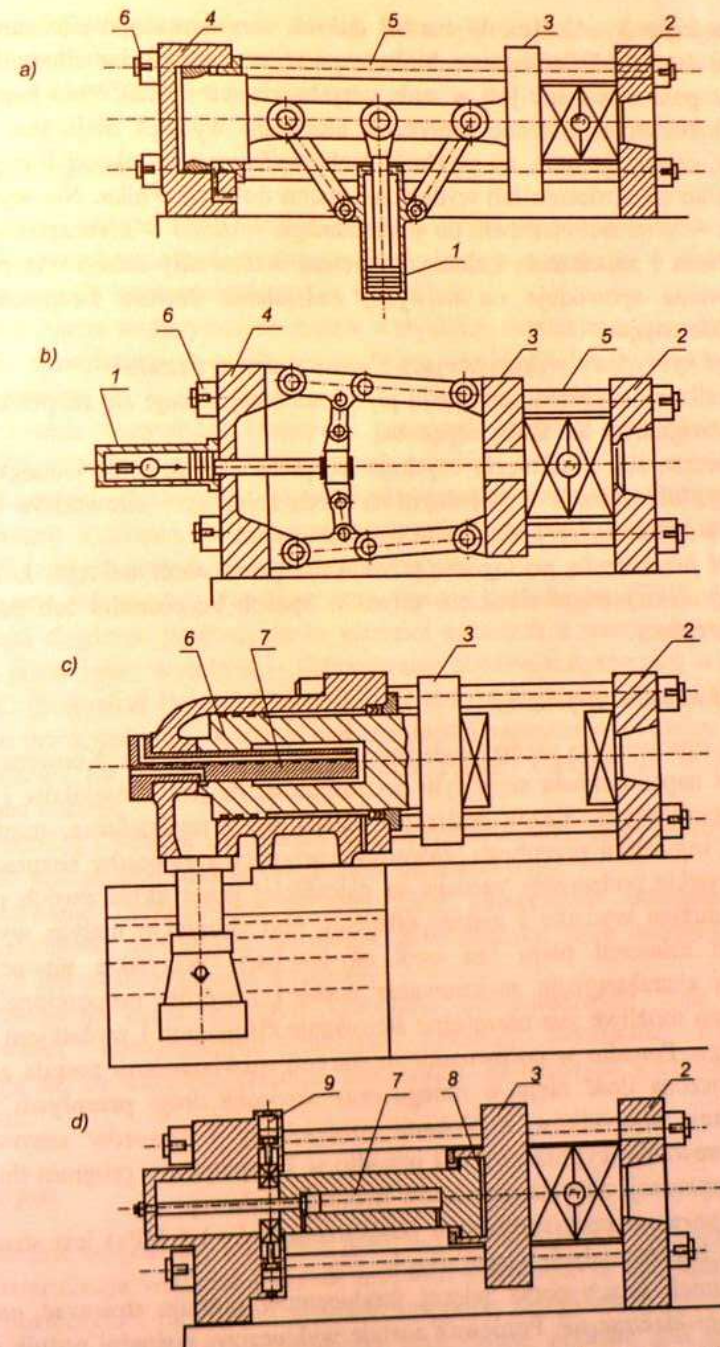
Napęd bezpośrednio hydrauliczny, w przypadku którego płyta ruchoma jest przesuwana przez wielostopniowy zespół siłowników hydraulicznych. Do realizacji szybkiego przesuwu służą siłowniki o małej średnicy tłoczyska i długim skoku, natomiast duże siły zamykania uzyskuje się za pomocą siłowników o dużej średnicy. W małych i średnich wtryskarkach oba siłowniki pracu-

Tablica 3.1

Dobór wyposażenia integralnego agregatu wtryskowego

Tworzywo (oznaczenie)	Ślimak				Dysza			
	geometria		końcówka		otwarta	tłoczkowa	iglicowa samozamykająca	iglicowa sterowana hydraulicznie
	normalna	specjalna	z pierścieniowym zaworem zwrotnym	normalna				
PS	+	-	+	o	+	+	+	+
SB	+	-	+	o	+	o	+	+
SAN	+	-	+	o	+	o	+	+
ABS	+	-	+	o	+	o	+	+
PE	o	+	+	o	+	+	+	+
PP	+	-	+	o	+	+	+	+
PVC	-	+	-	-	+	+	+	+
PVC-m	+	-	+	o	v	-	-	-
PMMA	+	-	+	o	v	-	-	-
PA	o	+	+	o	-	-	o	o
PA + WS	+	-	+	o	-	=	+	v
PUR	+	-	+	o	o	=	+	-
PETP	+	-	+	o	-	-	+	v
PC	+	-	-	o	+	-	+	v
POM	o	v	+	o	o	=	v	o
CA	+	-	+	o	o	=	o	+
CAB	+	-	+	o	v	o	+	+
PPO	+	-	+	o	v	o	+	+
PS spieniany	o	v	+	o	=	-	o	v

Oznaczenia: v – specjalnie zalecany, + – stosowany, o – dopuszczalny, - – niezalecany, = – niedopuszczalny.



Rys. 3.41. Budowa zespołów zamykania: a, b) kolanowo-dźwigniowe 5-punktowe, c) dwustopniowy bezpośredni, d) dwustopniowy z blokadą pośrednią; 1 – siłownik hydrauliczny, 2 – stół nieruchomy, 3 – stół ruchomy, 4 – płyta nastawna, 5 – kolumny prowadzące, 6 – nakrętki regulacyjne, 7 – siłownik szybkiego ruchu, 8 – siłowniki zwierania formy, 9 – siłowniki blokujące

ją równoległe (rys. 3.41c). W bardzo dużych wtryskarkach o sile zamykania powyżej 10 000 kN stosuje się blokadę pośrednią, a cylinder siłownika drugiego stopnia wykonany jest w stole wtryskarki (rys. 3.41d). Przy bezpośrednio hydraulicznym systemie zamykania niezbędny wydatek oleju jest zawsze większy, co rzutuje m.in. na szybkość ruchów. Zmiana wysokości formy odbija się tylko na skróceniu lub wydłużeniu ruchu tłoka siłownika. Nie występuje również – w przeciwieństwie do poprzedniego systemu – niebezpieczeństwo przeciążenia i zniszczenia kolumn, ponieważ wzrost siły zamykania podczas wtryskiwania spowoduje co najwyżej zadziałanie zaworu bezpieczeństwa w układzie napędu.

Napęd hybrydowy wykorzystujący elementy obu systemów:

- do realizacji szybkiego przesuwu płyty ruchomej stosuje się zespół kolano-dźwigniowy lub śrubę napędową,
- bezpieczną siłę zamknięcia uzyskuje się przez zastosowanie jednego centralnego lub czterech – po jednym na każdą kolumnę – siłowników o krótkim skoku, zwanych poduszkami hydraulicznymi.

Napęd przez śrubę pociągową przesuwaną przez obrót nakrętki kulkowej obracanej elektrycznym silnikiem serwo w sposób bezpośredni lub pośredni przez pas zębaty.

Zespół napędu wtryskarki

Nadal stosowane są niemal wyłącznie *napędy hydrauliczne*. Konwencjonalny zespół napędu składa się z tylu podzespołów, ile jest siłowników i silników hydraulicznych. Każdy podzespół składa się z rozdzielacza, regulatora ciśnienia, regulatora przepływu, zaworów zwrotnych i zaworów bezpieczeństwa. Wszystkie podzespoły zasilane są najczęściej przez układ dwóch pomp: jednej o dużym wydatku i niskim ciśnieniu oraz drugiej o małym wydatku i wysokim ciśnieniu oleju (na ogół ok. 160 bar). Wszystkie nowoczesne wtryskarki charakteryzuje zastosowanie pomp i zaworów proporcjonalnych. Dzięki temu możliwe jest niezależne sterowanie ciśnieniem i wydatkiem oleju napędowego. Ponadto w porównaniu ze starymi rozwiązaniami została znacznie zmniejszona ilość oleju w obiegu oraz skrócone drogi przepływu przez zintegrowanie siłowników z blokami rozdzielaczy i zaworów sterowania. System sterowania wyposażony jest ponadto w komputerowy program linearyzacji i kompensacji zużycia elementów hydrauliki siłowej.

Napęd pneumatyczny sprężonym powietrzem (0,6 ÷ 1,2 MPa) jest stosowany tylko w bardzo małych wtryskarkach.

W ostatnich latach coraz więcej producentów próbuje stosować *napędy bezpośrednio elektryczne*. Ponieważ zostaje wykluczony pośredni nośnik energii, jakim jest olej, oszczędności energii mogą dochodzić do 25%. Niewątpliwą zaletą jest możliwość wykluczenia również mgły olejowej w tzw. „czystych pomieszczeniach” przy produkcji specjalnej, np. soczewek, wyprasek

wysokie precyzyjnych, medycznych itp. Główną przeszkodą szerokiego zastosowania napędów elektrycznych jest jednak cena silników serwo, a więc i wyższy o ok. 35% koszt wtryskarek.

Zespół regulacji i sterowania

W bardzo starych konstrukcjach (do roku 1970) stosowany był tzw. system stycznikowy, obecnie zaś produkuje się wyłącznie wtryskarki o elektronicznym sterowaniu bezkontaktowym, co umożliwia:

- zastosowanie numerycznych nastaw wszystkich parametrów procesu;
- zapis parametrów w pamięci komputera wtryskarki lub w terminalu wydzielonym;
- sterowanie wszystkimi funkcjami maszyny, kontrolę tych funkcji oraz uzyskiwanie informacji o przyczynach awarii;
- podłączenie sterowania wyposażenia peryferyjnego (termoregulatorów, urządzeń zasilania, transportu, segregacji i kontroli), a więc tworzenie EGP – Elastycznych Gniazd Produkcyjnych;
- łączenie gniazd w ogólny Elastyczny System Produkcyjny (ESP) wydziału;
- dzięki ciągłemu porównywaniu wartości zadanych z rzeczywistymi i ocenie jakościowej wyrobów – dokonywanie obróbki statystycznej w systemie SPC (Statistical Process Control); tym samym kontroluje się jakość wyrobów przez pośrednią kontrolę powtarzalności parametrów procesu;
- śledzenie na ekranie wykresów zmian ciśnień i szybkości w funkcjach czasu i drogi;
- rejestrację i wydruk wszystkich danych rzeczywistych pracy maszyny;
- stałe poszerzanie pakietu programów dodatkowych;
- stosowanie optymalizacji procesu przez samoczynne dostosowanie się maszyny do zmiennych warunków zewnętrznych przy ustalonych kryteriach sterowania jakością wyprasek.

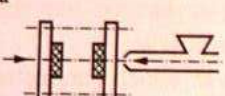
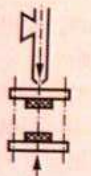
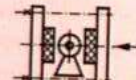
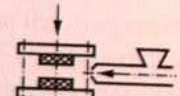
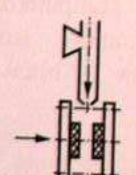
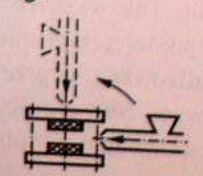
Stosowanie coraz lepszych systemów komputerowych stale poszerza możliwości nowoczesnych maszyn. Ostatnio stosowane rozwiązania opierają się na układzie czterech procesorów 32-bitowych i czterech 16-bitowych.

Korpus

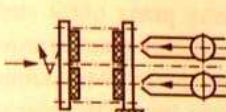
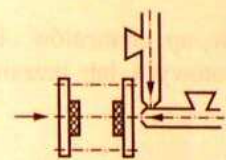
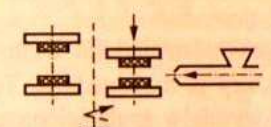
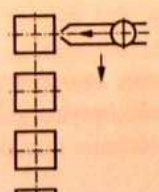
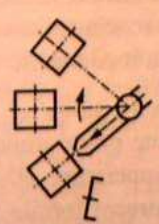
Zależnie od potrzeb, wzajemne położenie i liczba dwóch pierwszych zespołów determinują wielkość i kształt korpusu. Tak więc, są wtryskarki o *liniowym* poziomym i pionowym ułożeniu zespołów zamykania i agregatu wtryskowego. Wtryskiwanie jest wówczas realizowane poprzez stół nieruchomy wtryskarki. Natomiast przy ułożeniu *kątowym*, również poziomym lub pionowym, wtryskiwanie jest dokonywane bezpośrednio w płaszczyznę podziału formy (tabl. 3.2).

Tablica 3.2

Podział wtryskarek

Grupa	Rodzaj wtryskarki	Szkic	Przeznaczenie
Pojedyncze	liniowa	pozioma 	standardowe wykorzystanie wtryskarki
		pionowa 	wykonanie specjalne do wtryskiwania wyrobów z zapraskami lub przewidzianych do ręcznego wyjmowania (często z przesuwym lub obrotowym stołem)
	kątowna	pozioma 	do wtryskiwania dużych płaskich wyprasek; modułowa budowa dużych wtryskarek umożliwia ich ustawienie w układzie L
		pozioma 	do wtryskiwania wyprasek z zapraskami (często z przesuwym stołem)
		pionowa 	do wtryskiwania w płaszczyznę podziału formy
	liniowo-kątowna	ze zmiennym położeniem agregatu wtryskowego 	zwiększona uniwersalność wtryskarki

Tablica 3.2, cd.

Wielozespołowe	z wieloma agregatami wtryskowymi		do wtryskiwania wielokomponentowego lub wielokolorowego z dwoma agregatami (do 5) wtryskowymi pracującymi kolejno i stołem obrotowym
			do wtryskiwania dwukomponentowego równoczesnego
	z wieloma zespołami zamykania formy	w układzie obrotowym (wtryskarki karuzelowe) 	do wtryskiwania wyrobów o długim czasie chłodzenia
		w układzie rzędowym 	
		w układzie wachlarzowym 	

Do wtryskiwania wielokomponentowego lub wielokolorowego stosowane są wtryskarki z wieloma agregatami wtryskowymi. Do już wykonanego fragmentu wypraski dotryskiwany jest następny jej fragment, jednak potrzebne jest przemieszczenie wypraski do kolejnej formy przez obrót stołu ruchomego. Tą metodą można wykonywać np. twarde uszczelki pierścieniowe z miękką warstwą uszczelniającą. Przy zastosowaniu agregatów wtryskujących przez jedną dyszę można najpierw wtrysnąć małą porcję tworzywa pierwotnego, a następnie w miękkim środku podawać z drugiego cylindra tworzywo odpadowe lub spieniane. Wierzchnia warstwa zostaje rozciągnięta i po zastygnięciu odwzorowuje gniazdo formy.

Do produkcji bardzo grubych wyrobów, np. elementów obuwia, stosuje się jeden agregat wtryskowy, ale wiele obrotowych lub przesuwnych zespołów zamykania.

3.3.1.2. Specjalne typy wtryskarek

Niektóre odmiany procesu wtryskiwania wymagają specjalnie dostosowanych wtryskarek.

Wtryskiwanie wspomagane gazem obojętnym

Do niewielkiej porcji tworzywa doprowadzanego do formy zostaje wprowadzony sprężony azot (ok. 30 MPa), który ją rozdmuchuje. Ten rodzaj wtryskiwania jest stosowany przy produkcji wyrobów grubościennych lub o bardzo zróżnicowanej grubości ścianek: wieszaków, armatury łazienkowej, pojemników transportowych, a spośród elementów technicznych – uchwytów, gałek, pedału gazu samochodu, elementów armatury, obudów telewizorów z pogrubionym obrzeżem itp.

Wtryskiwanie z doprasowaniem

Gniazda formy zamykają się teleskopowo; tworzywo jest ściskane przez cały czas ochładzania (produkcja soczewek optycznych z PMMA, bardzo cienkich membran o grubym obrzeżu itp.; ciśnienie docisku do 3000 bar).

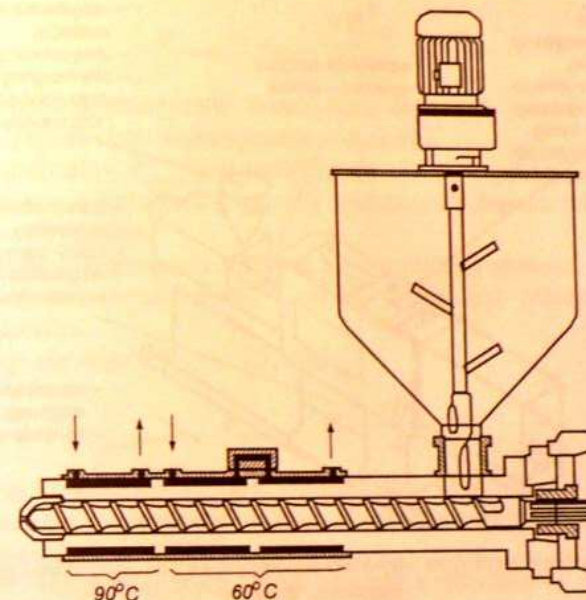
Wtryskiwanie z rozdmuchiowaniem

Zaraz po wtrysnięciu część stemplowa formy z niezastygniętym tworzywem zostaje przesunięta do innej formy o kształcie np. butelki, fiolki lub słoika. W wyniku rozdmuchu i ochłodzenia kształt zostaje utrwalony. Butelki z PET produkuje się metodą wtryskiwania, rozciągania niezastygniętej jeszcze wypraski wstępnej tzw. preformy i następnie rozdmuchu.

Wtryskiwanie tworzyw termoutwardzalnych i gumy

Tworzywo jest transportowane i dozowane przez ślimak. Cylinder wtryskowy (rys. 3.42) jest ogrzewany wodą do temperatury $60 \div 90^\circ\text{C}$. Usieciowanie tworzywa lub gumy następuje dopiero w gorącej formie wtryskowej o temperaturze ok. 180°C . Przednia część cylindra, w której może nastąpić niepożąda-

ne utwardzenie tworzywa, musi być szybko odłączana. Stopień sprężania ślimaka wynosi od 1,3:1 do 1:1. Stosuje się tylko dysze otwarte.



Rys. 3.42. Zespół wtrysku tworzyw termoutwardzalnych z ogrzewaniem cylindra płaszczem wodnym i z mieszadłem w leju zasypowym

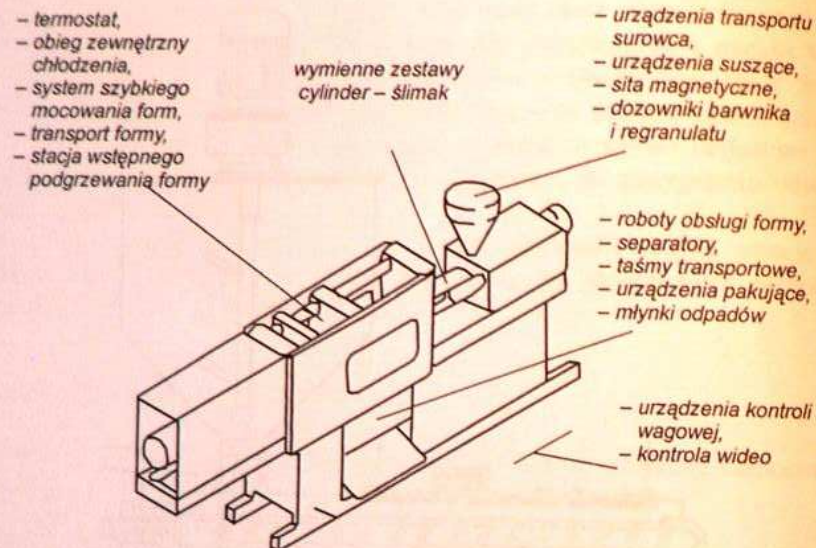
Wtryskiwanie żywic i kauczków utwardzalnych

Dwa komponenty żywicy lub np. kauczuku silikonowego doprowadzane są przez małe pompy i urządzenie mieszające do cylindra wtryskowego. Przyspieszone sieciowanie odbywa się w gorącej formie wtryskowej. Technologia jest typowa dla produkcji tłoczków strzykawek, uszczelki specjalnych, smoczków itp.

3.3.1.3. Wyposażenie wtryskarek

Wyposażenie będące wymienną lub dodatkową częścią maszyny określane jest jako *wyposażenie integralne*. Są to np. wymienne ślimaki i cylindry (agregaty) o różnych średnicach i wykonaniach, końcówki specjalne ślimaków, różne typy dysz, wypychacze hydrauliczne itp., a także – rozszerzające możliwości maszyny – moduły sterowania i programy komputerowe. Urządzenia wspomagające pracę maszyny z zewnątrz, jak roboty, termostaty regulacji temperatury form, urządzenia transportu tworzywa i wyprasek, urządzenia szybkiego zakładania form itp. nazywane są *wyposażeniem peryferyjnym* (rys. 3.43). Wyposażenie wtryskarki jest równie istotne dla procesu produkcyjnego, jak sama wtryskarka i forma. Brak np. termostatów regulacji temperatu-

ry formy przy wtryskiwaniu wyrobów technicznych dyskwalifikuje przygotowanie zakładu do tego typu produkcji.



Rys. 3.43. Wyposażenie peryferyjne wtryskarki współpracujące z poszczególnymi zespołami funkcjonalnymi maszyny

3.3.1.4. Wielkości charakterystyczne i wykorzystanie wtryskarki

Są to wielkości określające cechy użytkowe maszyny, niezbędne do dokonania analizy techniczno-ekonomicznej produkcji i doboru maszyny.

Średnica ślimaka D [mm]

Zależnie od potrzeb oferowane są jednostki wtryskowe o różnych średnicach ślimaka:

- | | |
|---------------------------------|---|
| podnominalnej $D_{p\text{nom}}$ | – wysokie ciśnienie wtryskiwania – $p_{wp\text{nom}}$, |
| | – mniejsza pojemność skokowa – $V_{wp\text{nom}}$ |
| | (wyroby cienkościenne, wyroby z tworzyw trudno płynnych); |
| nominalnej D_{nom} | – wykonanie standardowe; |
| nadnominalnej $D_{n\text{nom}}$ | – niższe ciśnienie wtryskiwania – $p_{wn\text{nom}}$, |
| | – większa pojemność skokowa – $V_{wn\text{nom}}$ |
| | (większe wyroby z tworzyw łatwo płynących). |

Droga dozowania $s_{pl\text{nom}}$ [mm]

Dla danej jednostki wtryskowej, jest to wartość stała, niezależna od D ślimaka.

$$s_{pl\text{nom}} \approx 4D_{\text{nom}} \text{ (wyjątkowo do } 5D)$$

Największa pojemność skokowa $V_{w\text{nom}}$ [cm³]

Wartość podawana dla ciśnienia wtryskiwania (1000 bar przy ślimaku o D_{nom})

$$V_{w\text{nom}} = s_{pl\text{nom}} \frac{\pi D_{\text{nom}}^2}{4 \cdot 100} [\text{cm}^3]$$

V_{nom} jest wartością teoretyczną, pomocniczą, stosowaną jedynie przy określaniu zakresu poprawnego wykorzystania wtryskarki.

Zakres minimalny $V_{w\text{min}}$ jest ograniczony:

- wytrzymałością termiczną tworzywa warunkującą dopuszczalny czas przebywania w cylindrze,
- koniecznością zachowania tolerowanej bezpiecznej grubości tzw. poduszki reszkowej pozostającej przed ślimakiem w przednim położeniu po zakończeniu docisku.

Przyjmuje się więc $s_{pl\text{min}} = 1D$, stąd:

$$V_{w\text{min}} = 1D \cdot \frac{\pi D^2}{4}$$

Zakres maksymalny $V_{w\text{max}}$ jest warunkowany:

- koniecznością kompensacji skurczu objętościowego stygnącego tworzywa wynoszącego:
 - do 7% wtrysniętej objętości dla tworzyw amorficznych,
 - do 20% wtrysniętej objętości dla tworzyw częściowo krystalicznych;
- nierównomiernym rozkładem temperatury tworzywa na drodze s_{pl} ; duże zróżnicowanie może powodować uszkodzenie termiczne tworzywa;
- wahaniami homogeniczności powstającymi przy nadmiernym skracaniu strefy zasilania przy wycyfowywaniu się ślimaka;
- wadami spowodowanymi złą ewakuacją powietrza z granulatu (wydłużone pęcherze w wyprasce).

Przyjmuje się $s_{pl\text{max}} \leq 3D$, a tym samym:

$$V_{w\text{max}} \leq 3D \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

Optymalny zakres V_w wykorzystania wtryskarki wynosi więc (rys. 3.44):

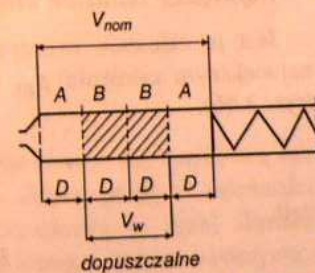
$$0,25V_{w\text{nom}} \leq V_w \leq 0,75V_{w\text{nom}}$$

Dobór V_w dla danej średnicy ślimaka ułatwia nomogram z rys. 3.45.

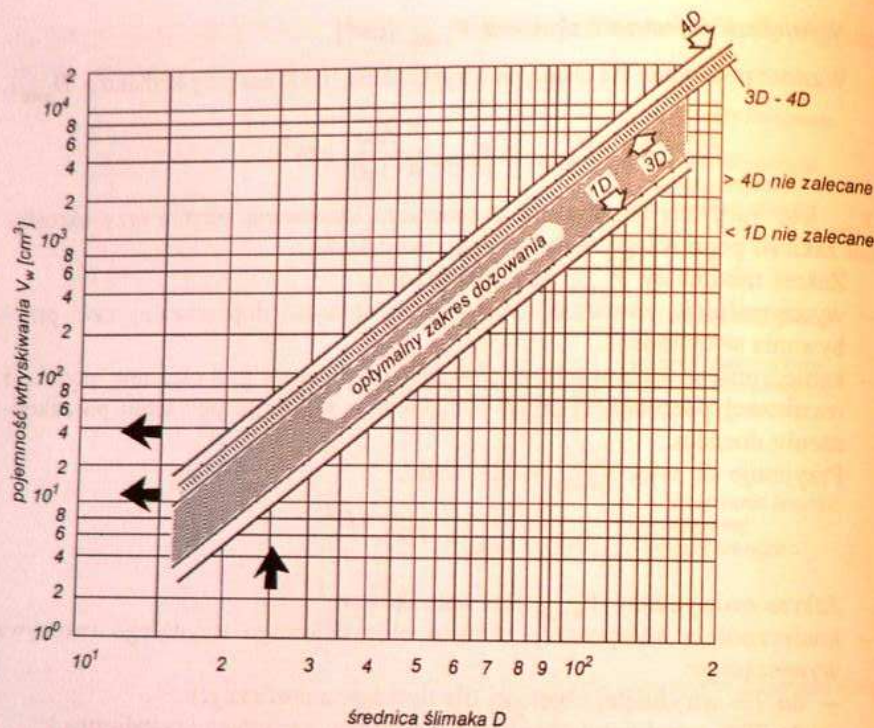
Największa masa wtryskiwania $G_{w\text{nom}}$ [g]

Podawana jest dla PS i ciśnienia wtryskiwania 1000 bar, stąd dla PS:

$$G_{w\text{nom}} = V_{w\text{nom}} \rho_{PS}$$



Rys. 3.44. Zalecany zakres wykorzystania pojemności wtryskiwania



Rys. 3.45. Określanie dopuszczalnej objętości wtrysku zależnie od D_{nom} ślimaka. Przykład: Określić zalecany zakres V_w dla wtryskarki, w której $D_{nom} = 25$ mm z nomogramu: $V_{wmin} = 14$ cm³, $V_{wmax} = 38$ cm³. Dobrać wtryskarkę dla formy o pojemności wtrysku ok. 120 cm³. Wtryskarka wykorzystana ekonomicznie powinna mieć ślimak o $D_{nom} = 45$ mm (wg górnego zakresu nomogramu)

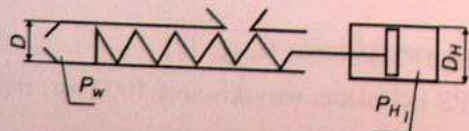
Największe ciśnienie wtryskiwania p_{wnom} [bar]

Jest to ciśnienie tworzywa przed czołem ślimaka o średnicy D_{nom} przy największym ciśnieniu p_{H1} (stopnia pierwszego) w cylindrze hydraulicznym (rys. 3.46).

$$\frac{\pi D^2}{4} p_w = \frac{\pi D_H^2}{4} p_{H1}$$

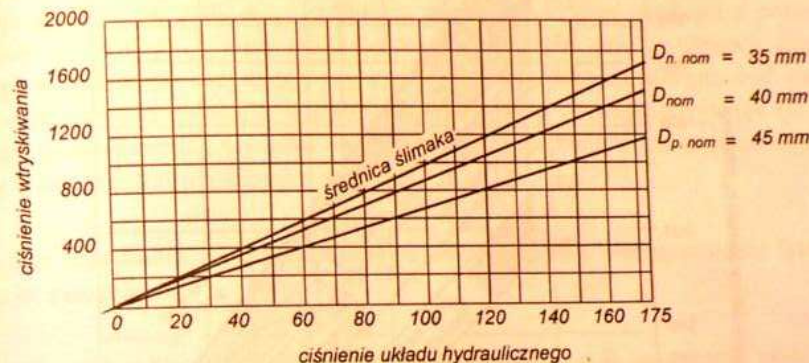
stąd:

$$p_w = \frac{D_H^2}{D^2} p_{H1} \quad \text{lub} \quad p_{H1} = \frac{D^2}{D_H^2} p_w$$



Rys. 3.46. Zależności geometryczne ślimaka i siłownika hydraulicznego

Nastawną wartość p_{H1} należy obliczyć lub przyjąć z wykresu podawanego w instrukcji maszyny (rys. 3.47). W nowszych wtryskarkach nastawia się ją cyfrowo i kontroluje na ekranie monitora.



Rys. 3.47. Zależność między ciśnieniem wtryskiwania a ciśnieniem w układzie hydraulicznym (dla wtryskarki FORMOplast 235/80)

Wydatek uplastyczniania Q_{plnom} [g/s]

Q_{plnom} podawany jest dla PS, Q_{pl} zależy od obrotów ślimaka, ciśnienia uplastyczniania, geometrii ślimaka i drogi dozowania (aktywnej długości ślimaka) oraz własności reologicznych tworzywa.

Średnia obliczeniowa wartość:

$$Q_{pl} = \frac{G_w}{t_{pl}}$$

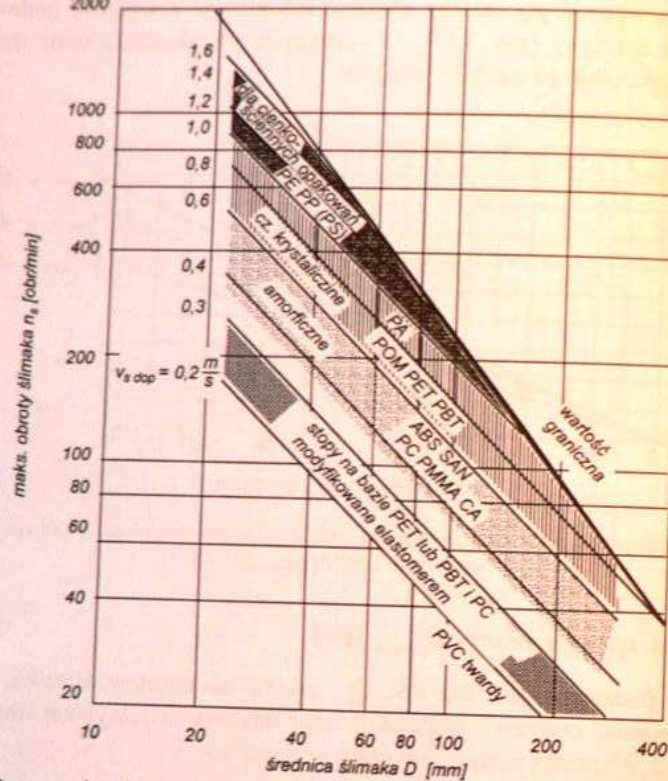
gdzie t_{pl} – czas uplastyczniania [s].

Zakres obrotów ślimaka $n_{smin} - n_{smax}$ [min⁻¹]

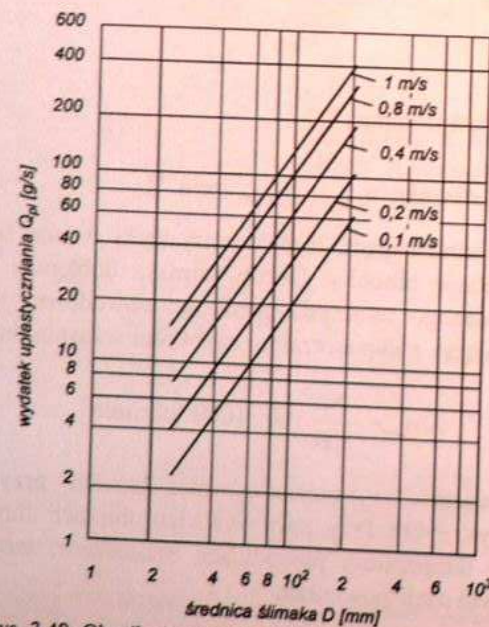
Zależnie od systemu napędu ślimaka wtryskarki stosuje się stopniową lub bezstopniową regulację obrotów. Obroty ślimaka dobierane są w zależności od zalecanej dla danego tworzywa prędkości obwodowej v_s [m/s] ślimaka (rys. 3.48), wynikającej z dopuszczalnej szybkości ścinania danego tworzywa:

$$n_s = \frac{v_s}{\pi D} \cdot 60 \cdot 1000 \text{ [obr/min]}$$

Po ustaleniu wartości v_s można również określić przybliżony wydatek uplastyczniania (rys. 3.49). Przy zbyt wysokich obrotach ślimaka może nastąpić podwyższenie temperatury powodujące uszkodzenie termiczne tworzywa lub utrudnienie ewakuacji powietrza.



Rys. 3.48. Dopuszczalne obroty dla różnych prędkości obrotowych ślimaków o różnych średnicach



Rys. 3.49. Określenie wydatku uplastyczniania Q_{pl} dla PS

Wydatek wtryskiwania Q_{wnom} [g/s]

Określany jest dla PS i ciśnienia 1000 bar. Jest nastawiany przez regulację wydatku oleju do cylindra hydraulicznego. Największy wydatek Q_{wnom} otrzymuje się przy ok. 80% p_{wnom} ciśnienia wtryskiwania przy zasilaniu z pompy i przy ok. 66% p_{wnom} przy zasilaniu przez akumulator gazowo-olejowy. Strumień wtryskiwania decyduje o szybkości wypełniania, która powinna być stała na całej długości płynięcia, niezależnie od przekroju wypraski. Uzyskuje się to przez programowanie wydatku oleju, w stosunku procentowym na poszczególnych odcinkach drogi ślimaka s_w .

Siła zamykania P_z [kN] (siła wywierana przez zespół zamykania na formę po jej zamknięciu)

Siła zwierania P_{zw} [kN] (siła wywierana na zespół zamykania podczas wtryskiwania tworzywa do formy (dla kolanowo-dźwigniowego układu zamykania $P_{zw} = 1,1P_z$ wg firmy Engel)

Zróznicowanie to występuje wyłącznie przy kolanowo-dźwigniowym systemie zamykania. Przy bezpośrednio hydraulicznym systemie zamykania $P_{zw} = P_z$. W pierwszym przypadku przekroczenie siły zwierania może spowodować uszkodzenie kolumn wtryskarki. W drugim przypadku zadziała jedynie zawór bezpieczeństwa i nastąpi uchylenie formy (p. 3.3.1.5). Przyjmuje się:

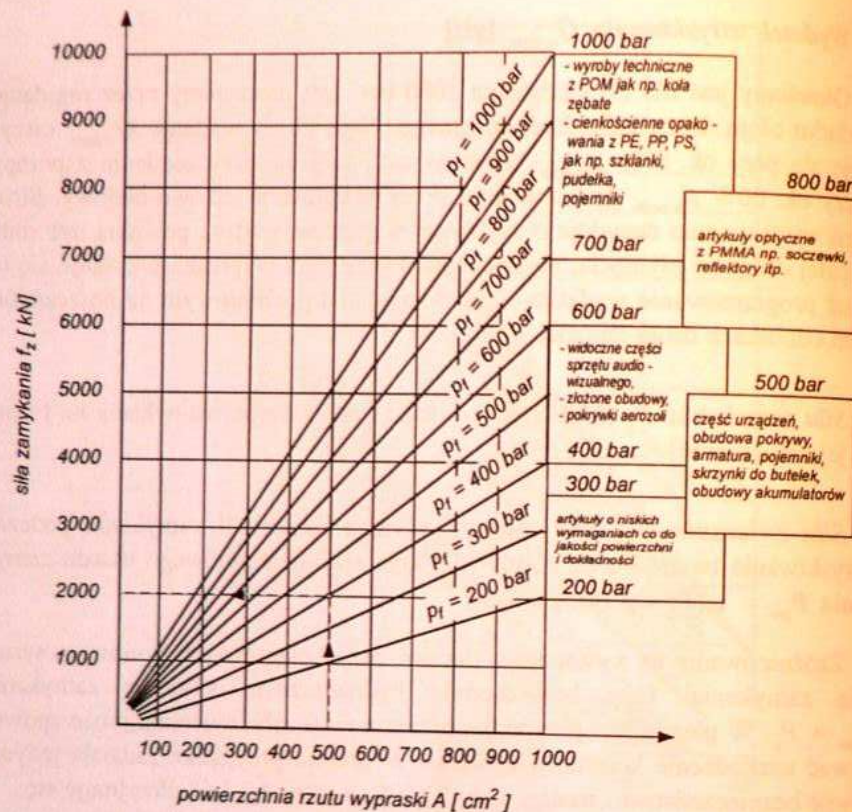
$$0,8P_z \geq \frac{p_f F}{10} \text{ [kN]}$$

gdzie: F – powierzchnia rzutu wyprasek [cm²], p_f – średnie ciśnienie w gnieździe formującym [bar] (rys. 3.50 i tabl. 3.3), 0,8 – współczynnik bezpieczeństwa.

Tablica 3.3

Zalecane średnie wartości ciśnienia p_f w formie w zależności od rodzaju tworzywa

Tworzywo	p_f [bar]
PE LD	250 – 300
PS, SAN, SB	300 – 350
PA	250 – 350
ABS	350 – 450
PMMA	400 – 500
PVC twardy	400 – 500
PC, POM	500 – 600



Rys. 3.50. Diagram wstępnego określenia siły zamykania formy w zależności od średniego ciśnienia p_f w gnieździe formującym i powierzchni rzutu wszystkich wyprasek F (1 bar = 0,1 MPa)

Czas ruchu jałowego t_j [s] (czas biegu na sucho)

Jest to czas konieczny do wykonania jednego cyklu bez przetwarzania tworzywa. Składają się nań czasy zamykania i otwierania formy, czasy odsuwania i dosuwania cylindra i czasy przełączeń. Przyjmując, że czas wtryskiwania jest bardzo krótki – wynosi najczęściej $0,05 \div 2$ s – można założyć, że na szacunkowy czas cyklu składa się czas biegu na sucho, czas chłodzenia i czas przerwy. Producenci nowoczesnych wtryskarek dążą do maksymalnego skrócenia czasu biegu jałowego. W tzw. wtryskarkach szybkobieżnych możliwe jest uzyskanie do 50 cykli/minutę. W tabl. 3.4 przedstawiono średnie czasy ruchu jałowego dla wtryskarek różnej wielkości.

Coraz częściej brany pod uwagę wielkościami znamionowymi są:

- pobór prądu [kW],
- zajmowana powierzchnia.

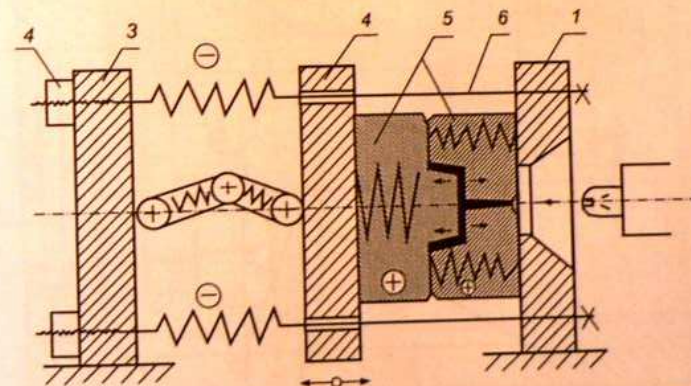
Tablica 3.4

Przybliżone czasy ruchu jałowego różnej wielkości wtryskarek

Siła zamykania [kN]	Czas biegu na sucho [s]
25	0,8 – 1,8
50	0,9 – 1,5
100	1,1 – 2,0
200	1,7 – 4,0
500	2,0 – 7,0
1000	5,5 – 10
3000	15 – 25

3.3.1.5. Współpraca wtryskarki z formą

Forma i zespół zamykania wtryskarki stanowią układ, w którym na każdym etapie procesu wtryskiwania musi zachodzić równowaga sił. W kolano-dźwigniowym zespole zamykania po wyprostowaniu dźwigni forma jest zamykana z siłą P_z . W kolumnach wtryskarki występują naprężenia rozciągające (rys. 3.51), w wyniku których następuje ich odkształcenie sprężyste o wartości f_n .



Rys. 3.51. Schemat odkształceń sprężystych występujących w kolano-dźwigniowym systemie zamykania wtryskarki: 1 – stół nieruchomy, 2 – stół ruchomy, 3 – stół nieruchomy nastawny, 4 – nakrętki regulacyjne, 5 – połówki formy, 6 – kolumny prowadzące

Wartość siły zamykania P_z jest wartością nominalną, ale osiąganą tylko przy prawidłowym ustawieniu stołów na wysokość formy. Nawet niewielka niedokładność ustawienia powoduje gwałtowny spadek siły zamykania.

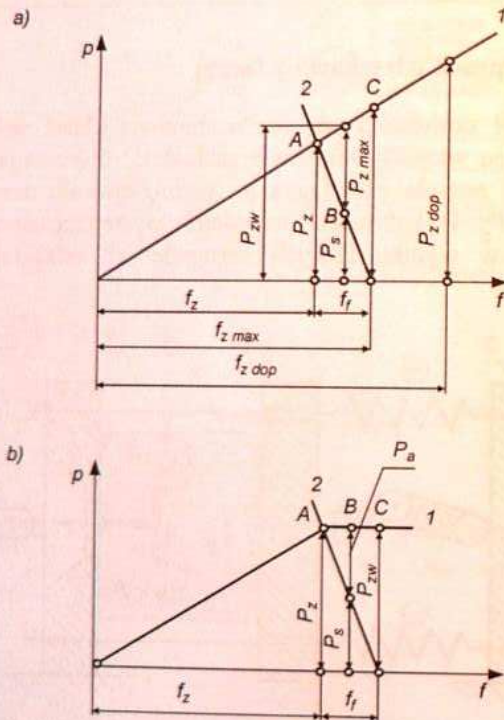
W przedstawionym na rys. 3.52a diagramie prosta 1 pokazuje odkształcenia przy rozciąganiu kolumn, a prosta 2 – odkształcenia przy ściskaniu formy. Pochylenie prostych stanowi miarę sztywności. Odkształcenie dźwigni, sumujące się z odkształceniem kolumn, pomijamy, aby uprościć rozumowanie. Stanowi się z odkształceniem kolumn, pomijamy, aby uprościć rozumowanie. Stanowi się z odkształceniem kolumn, pomijamy, aby uprościć rozumowanie. Stanowi się z odkształceniem kolumn, pomijamy, aby uprościć rozumowanie.

$$P_a = p_f F \text{ [kN]}$$

Półowki formy pozostają dociśnięte resztkową siłą zamykania P_s (punkt B). W zespole zamykania wystąpi siła zwierania

$$P_{zw} = P_a + P_s > P_z \text{ [MN]}$$

Dopóki $P_a < P_{z \max}$, nie nastąpi uchylenie formy. W granicznym punkcie C, $P_a = P_{z \max}$, a resztkowa siła zamykania połówek formy zanika, ponieważ $P_s = 0$. W przypadku, gdy $P_a > P_{z \max}$, forma zostanie uchylona i wystąpi wypływka na wyprasce, jeśli $f_f > 0,03 \div 0,05 \text{ mm}$.



Rys. 3.52. Diagram odkształceń sprężystych formy i kolumn wtryskarki z systemem zamykania: a) kolanowo-dźwigniowym, b) bezpośrednio hydraulicznym

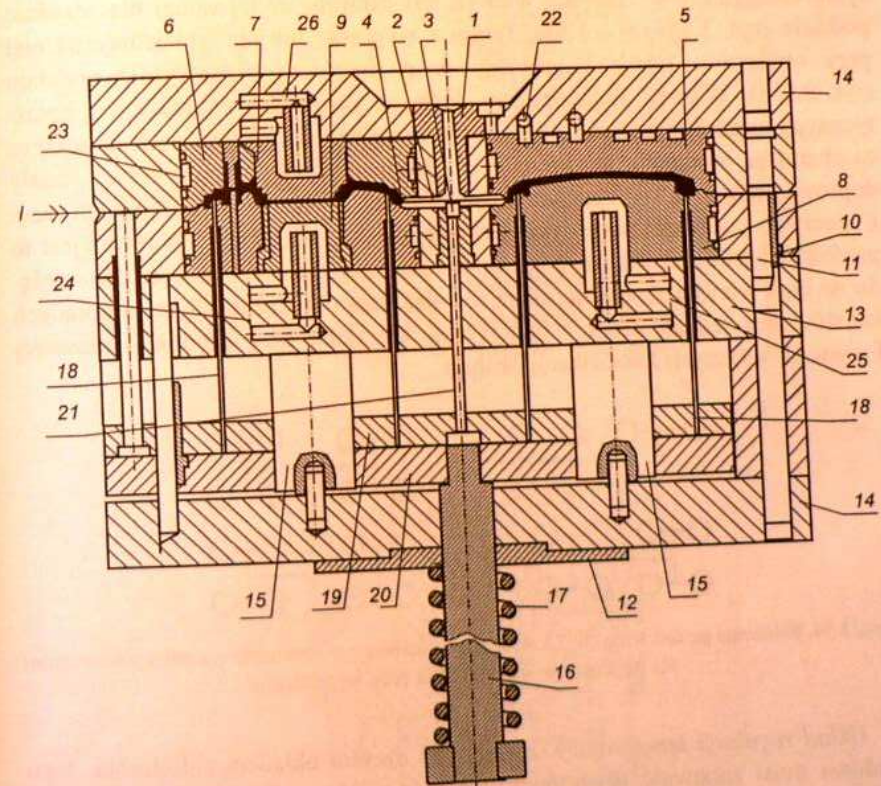
Maksymalna siła zwarcia $P_{z \max}$ zależy od sprężystości kolumn wtryskarki oraz formy, nie stanowi więc wartości stałej dla wtryskarki. Przy złym ustawieniu jednej z nakrętek dostosowujących długość kolumn do wysokości formy może nastąpić przekroczenie $P_{z \text{ dop}}$ i odkształcenie plastyczne lub pęknięcie kolumny prowadzącej.

System zamykania bezpośrednio hydrauliczny jest najczęściej wyposażony w zawór przelewowy i każdy wzrost obciążenia ponad nominalną wartość P_z spowoduje wzrost ciśnienia hydraulicznego i upust oleju. Jak widać na diagramie (rys. 3.52b) siła zamykania P_z równa jest sile zwarcia $P_{zw} = \text{const}$. Przekroczenie przez siłę rozwierającą P_a wielkości P_z powoduje niesprężyste

uchylenie formy i wypływki. W systemie kolanowo-dźwigniowym natomiast uchylenie formy jest sprężyste i po zmniejszeniu ciśnienia w gnieździe w wyniku skurczu tworzywa nastąpi powtórne zwarcie połówek formy.

3.3.2. BUDOWA FORMY WTRYSKOWEJ

Formy wtryskowe są narzędziami o najwyższym stopniu skomplikowania. W odróżnieniu od narzędzi do obróbki metali, służą one nie tylko do uzyskania wyrobu o określonej postaci zewnętrznej, lecz także o określonej budowie wewnętrznej decydującej o trwałości i właściwościach użytkowych wyrobów. Każda forma wtryskowa (rys. 3.53) składa się z następujących podzespołów – układów:

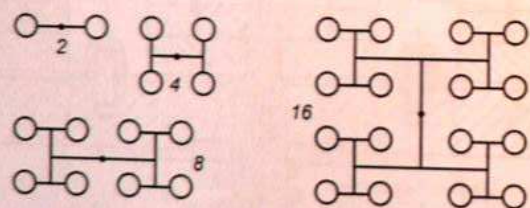


Rys. 3.53. Budowa typowej formy wtryskowej: 1 - tuleja wlewowa, 2 - kanał wlewowy, 3 - zaczep wlewka, 4 - przewężka, 5, 6, 7 - wstawki formujące matrycy, 8, 9 - wstawki formujące matrycy, 10 - tuleja prowadząca, 11 - kołek prowadzący, 12 - pierścień centrujący formę, 13 - stempla, 14 - płyta mocująca, 15 - tuleje podpierające, 16 - zderzak, 17 - sprężyna, 18 - wypychacze, 19 - płyta wypychaczy, 20 - płyta podpierająca wypychacze, 21 - wypychacz wlewka, 22-26 - kanały chłodzące

Układy technologiczne formy

Elementy formujące, tzw. gniazda formy. Stopień ich skomplikowania i budowa są określone konstrukcją wyrobu. Natomiast konstrukcja wyrobu musi uwzględniać warunki wypełniania gniazda, chłodzenia i sposobu usuwania wypraski z formy. Budowa gniazda wpływa więc nie tylko na własności użytkowe i jakość wyrobu, ale również na ekonomiczność produkcji. Liczba gniazd w formie zależy od budowy wyrobów, potrzeb i możliwości technicznych maszyny.

Układ wlewowy. Determinuje on miejsce i sposób doprowadzenia tworzywa, tak aby – w przypadku form wielogniazdowych – w każdym gnieździe (rys. 3.54) panowały takie same warunki wypełniania, tzn. takie samo ciśnienie i szybkość płynięcia. W formach wtryskowych do tworzyw termoplastycznych najczęściej stosowany i najtańszy jest **system zimnych kanałów** doprowadzających. Zastygnięty w kanałach wlewek jest usuwany w tej samej płaszczyźnie podziału (rys. 3.53) (rys. 3.55a) razem z wypraską lub też oddzielany od niej przy otwieraniu formy i usuwany w pomocniczej płaszczyźnie podziału (rys. 3.55b). Wlewek jest odpadem, który w przypadku tworzyw termoplastycznych może być po zmieleniu повторно zagospodarowany, jeżeli dopuszcza to charakter produkcji. W formach z **gorącymi kanałami** (rys. 3.55c) kanały doprowadzające są wykonane w ogrzewanej płycie zwanej rozdzielaczem i tworzywo przez specjalne dysze jest wtryskiwane do formy. Ponieważ jest to produkcja bezodpadowa, uzyskuje się znaczne oszczędności surowca. Ze względu na brak wlewka skróceniu ulega również czas chłodzenia. System gorących kanałów jest jednak drogi – amortyzuje się tylko przy produkcji masowej i wymaga wyższych kwalifikacji obsługi.



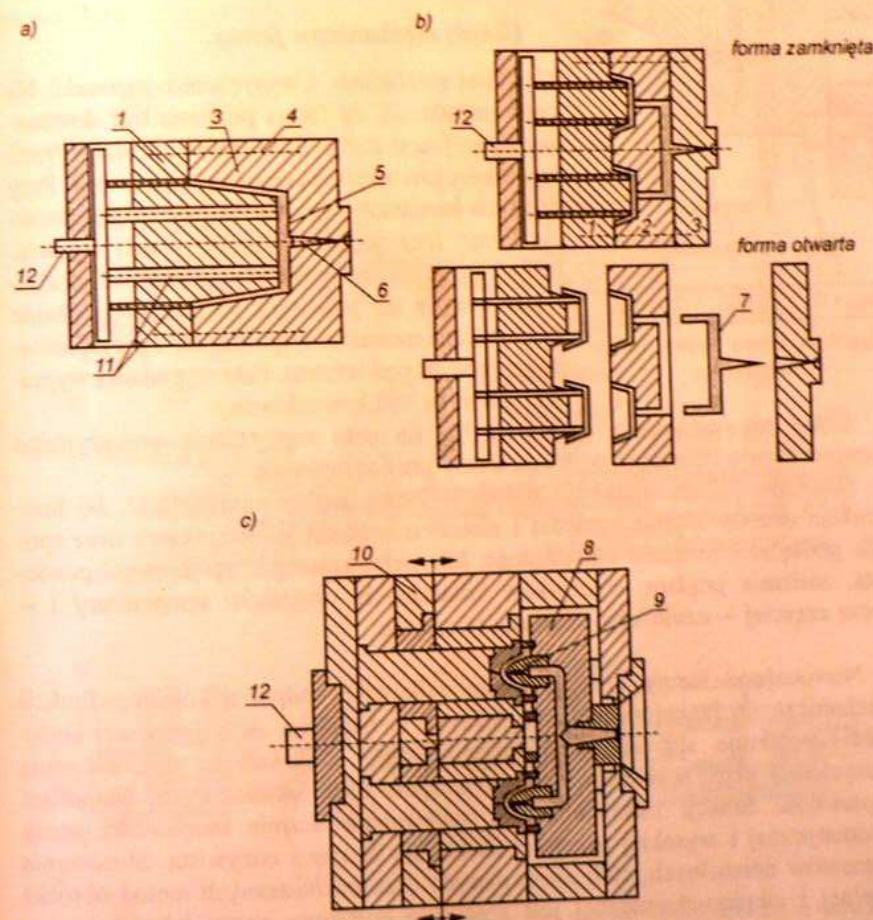
Rys. 3.54. Położenie gniazd w formie (2, 4, 8, 16) umożliwiające spełnienie warunku powtarzalności parametrów wtryskiwania przy wypełnianiu

Układ regulacji temperatury. Zwany jest czasem układem chłodzenia. Jego budowa musi zapewnić równomierny odbiór ciepła z obu stron powierzchni wyprasek. Zależnie od rodzaju produkcji i typu tworzywa odbywa się to z różną szybkością, a więc formy (a nawet poszczególne ich strefy) muszą mieć różną temperaturę. Przy produkcji masowej np. opakowań cienkościennych przez kanały przepływa woda o temp. $5 \div 15^\circ\text{C}$, a przy wtryskiwaniu wyrobów technicznych z tworzyw częściowo krystalicznych – woda o temp. $60 \div 95^\circ\text{C}$ lub nawet

medium o temp. do 140°C . Forma wtryskowa stanowi zamknięty układ termodynamiczny, do wnętrza którego ciepło jest doprowadzane przez wtryskiwane tworzywo, a odprowadzane na zewnątrz – przez układ chłodzenia i na skutek strat cieplnych. Bilans cieplny formy wtryskowej (rys. 3.56) jest następujący:

$$\Sigma Q = Q_{pt} + Q_w + Q_T + Q_s = 0$$

gdzie: Q_{pt} – ciepło dostarczone przez uplastycznione tworzywo, Q_w – ciepło pozostałe w wypadającej wyprasce, Q_T – ciepło odprowadzone lub doprowa-

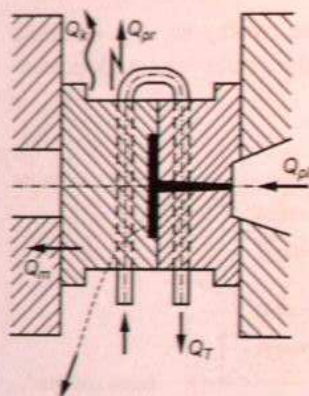


Rys. 3.55. Układy wlewowe form wtryskowych: a) wlew bezpośredni z zimnym kanałem, b) wlew pośredni z zimnym kanałem w pomocniczej płaszczyźnie podziału, c) wlew przez gorące kanały; 1 – połowka ruchoma, 2 – płyta pośrednia, 3 – połowka nieruchoma, 4 – słupy prowadzące, 5 – 1 – połowka ruchoma, 6 – blok rozdzielacza, 7 – dysze gorących kanałów, 8 – wlew bezpośredni, 9 – wlewki, 10 – wypychacze, 11 – wypychacze, 12 – zderzak

dzone przez obieg chłodzący, Q_s – ciepło odprowadzone do otoczenia (straty cieplne); przy czym:

$$Q_s = Q_m + Q_{pr} + Q_k$$

gdzie: Q_{pr} – ciepło wypromieniowane, Q_m – ciepło przekazane do stołów wtryskarki, Q_k – ciepło konwekcji.



$$Q_{pl} = Q_w + Q_r + Q_m + Q_{pr} + Q_k$$

Rys. 3.56. Bilans cieplny formy wtryskowej

Poprawność budowy układów technologicznych jest coraz częściej kontrolowana drogą symulacji komputerowej jeszcze przed wykonaniem formy.

Układy mechaniczne formy

Układ uwalniania i wypychania wypraski. Na ogół zakłada się, że forma powinna być dostosowana do pracy całkowicie automatycznej. Przed wypchnięciem wypraska musi być uwolniona. Przy prostych kształtach zapewnia to najczęściej otwarcie formy, lecz często trzeba z wypraski wysunąć lub wykręcić elementy metalowe (rdzenie) kształtujące otwory lub podcięcia boczne. Wypychanie mechaniczne może być wspomagane i przyspieszane sprężonym powietrzem. Fakt wypadania wyprasek powinien być kontrolowany.

Układ prowadzenia i ustalania. Ma na celu zapewnienie precyzyjnego naprowadzenia i złożenia połówek formy przy zamykaniu.

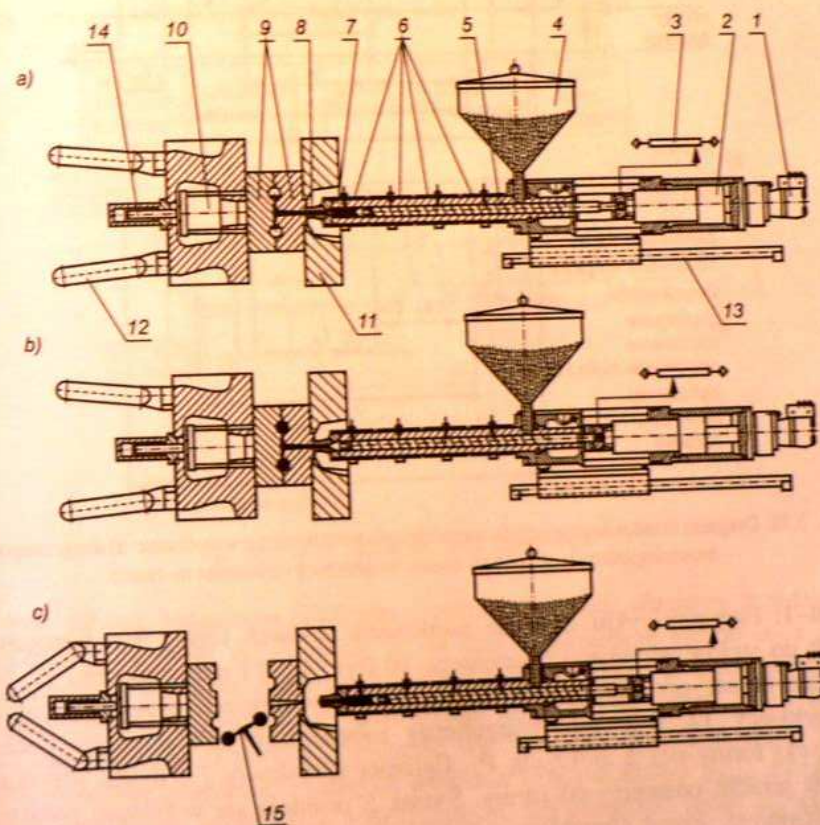
Obudowa. Wiąże wszystkie układy w jedną, funkcjonalną całość. Jej konstrukcja określa sposób ustalenia i mocowania formy na wtryskarce oraz sposób podłączeń medium chłodzącego lub ogrzewającego, sprężonego powietrza, zasilania prądem, styczników kontrolnych, czujników temperatury i – coraz częściej – czujników ciśnienia tworzywa.

Nowoczesne formy charakteryzuje całkowite podporządkowanie funkcji mechanicznych funkcjom technologicznym. Oznacza to, że w pierwszej kolejności projektuje się układy pierwszej grupy, ponieważ to one decydują o uzyskaniu przez wyrób pożądanego zespołu cech jakościowych. Natomiast poprawność funkcji mechanicznych, zapewnienie formie możliwości pracy automatycznej i wysokiej trwałości uważa się za rzecz oczywistą. Stosowanie elementów normalnych, stali atestowanych oraz nowoczesnych metod obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej jest kolejnym kryterium oceny jakości formy. Przeciętnie określa się trwałość formy na ok. 1 mln cykli wtryskiwania, lecz obecnie jest możliwe osiąganie trwałości powyżej 10 mln cykli. Dwukrotna forma przedstawiona na rys. 3.53 została skonstruowana z wykorzystaniem znormalizowanego korpusu i pomocniczych elementów normalnych. Zdarza się też, że do określonej formy trzeba zamówić specjalnie dostosowaną wtryskarkę.

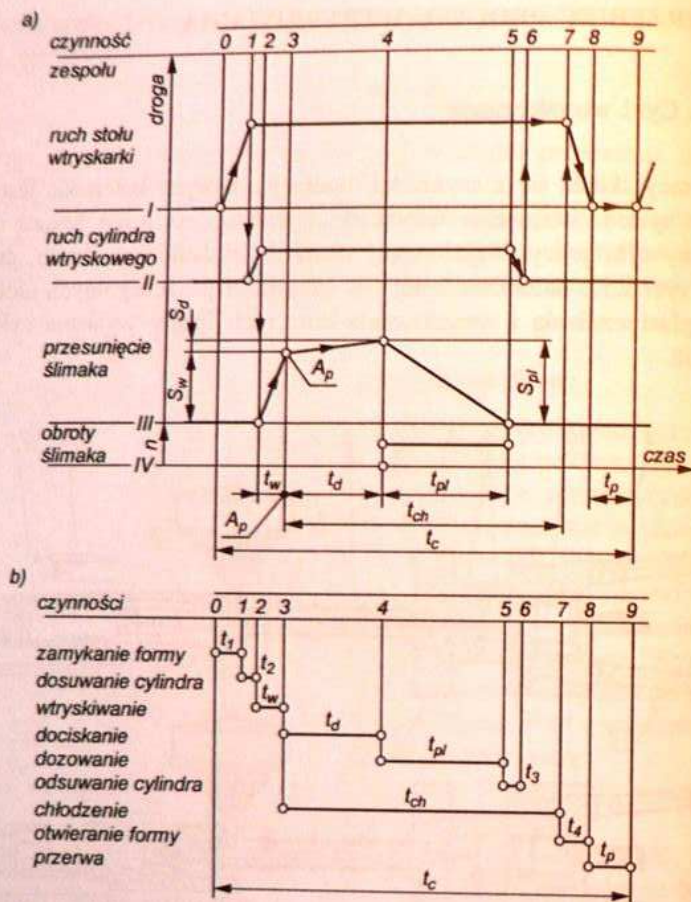
3.3.3. PRZEBIEG PROCESU WTRYSKIWANIA

3.3.3.1. Cykl wtryskiwania

Cykl pracy składa się z czynności (operacji), których kolejność jest określana przez system sterowania wtryskarki i realizowana przez zespół napędu. Podstawowy cykl pracy, wyjaśniający również działanie wtryskarki, przedstawiono na rys. 3.57, natomiast kolejność czynności poszczególnych elementów zespołu uplastyczniania i wtryskiwania oraz ruch formy wyjaśnia cyklogram na rys. 3.58.



Rys. 3.57. Schemat działania wtryskarki ślimakowej: a) faza wtrysku, b) faza docisku, c) usuwanie
1 – silnik napędu ślimaka, 2 – tłok siłownika hydraulicznego przesuwu ślimaka, 3 – wypraska; 4 – lej zasypowy, 5 – ślimak uplastyczniający, 6 – grzejniki, 7 – cylinder tworzywa, 8 – dysza, 9 – forma, 10 – ruchomy stół wtryskarki, 11 – łącznik drogowy położenia ślimaka (dozowania), 12 – dźwignia kolanowa, 13 – prowadnica agregatu wtryskowego, 14 – siłownik wypychacza, 15 – wypraska



Rys. 3.58. Diagram standardowego cyklu wtryskiwania tworzywa we wtryskarce: a) drogi zespołów technologicznych w funkcji czasu, b) przebieg czynności w czasie

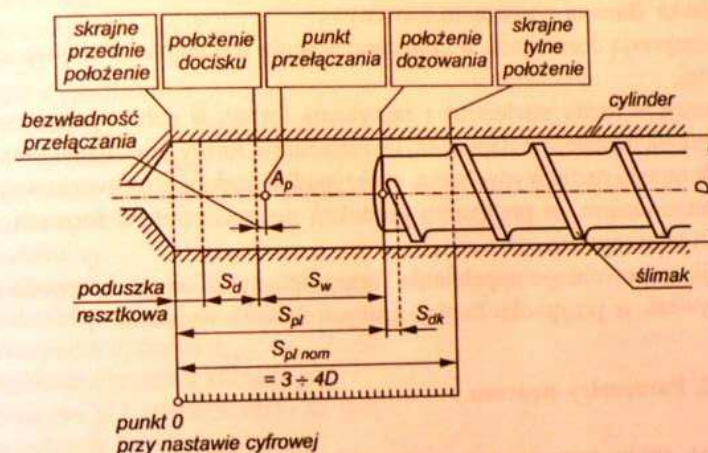
0-1: Początek cyklu. Szybkie zamknięcie połówek formy 9 przymocowanych do stołów wtryskarki: ruchomego 10 (rys. 3.57) i nieruchomego 11. Stół ruchomy jest przesuwany po kolumnach prowadzących przez mechanizm zamykający 12. Siłownik hydrauliczny napędzający stół ruchomy dociska połówki formy siłą zamykającą P_z . Cylinder wtryskowy 7 z dyszą wtryskarki 8 jest jeszcze odsunięty od formy. Ślimak 5 znajduje się w tylnym położeniu wyjściowym. Przed ślimakiem znajduje się już ściśle określona ilość uplastycznionego tworzywa.

1-2: Agregat wtryskowy zostaje dosunięty tak, że dysza wtryskarki naciska na tuleję wtryskową formy.

2-3: Pod wpływem ciśnienia oleju p_{H1} , wywołanego w siłowniku hydraulicznym 2, następuje przesunięcie ślimaka, połączonego sprzęgłem z tłokiem siłownika, na drodze wtryskiwania s_w . Powoduje to wtrysknięcie uplastycznio-

nego tworzywa do gniazda formy pod ciśnieniem p_w , jakie występuje na czole ślimaka w czasie t_w .

3-4: W punkcie A_p następuje przełączenie ciśnienia p_w wtryskiwania na ciśnienie p_d docisku, dzięki temu, że w siłowniku hydraulicznym 2 następuje zamiana pierwszego stopnia ciśnienia p_{H1} na drugi stopień ciśnienia p_{H2} . Następuje związane ze skurczem tworzywa powolne, nieznaczne przesuwanie ślimaka o wartość s_d drogi docisku. Przełączanie ciśnienia w punkcie A_p może odbywać się w funkcji: czasu, drogi lub sygnału wzrostu ciśnienia w formie. W czasie t_d trwania docisku uzupełniany jest ubytek skurczowy tworzywa (do 20% V_w). Docisk trwa aż do chwili zastygnięcia przewężek w formie. Jednocześnie w czasie t_{ch} trwa chłodzenie wypraski (rys. 3.58b). Po zakończeniu wtryskiwania przed ślimakiem znajduje się niewielka ilość tworzywa, zwana poduszką reszkową (rys. 3.59).



Rys. 3.59. Składowe drogi dozowania

4-5: Ślimak napędzany silnikiem 1 rozpoczyna ruch obrotowy z ustaloną prędkością obrotową n_s ; pozwala to na ciągłe pobieranie tworzywa z leja zasypowego 4 i przetwarzanie go do przedniej części cylindra. Uplastycznione i przetłoczone pod ciśnieniem przez ślimak tworzywo przesuwane jest w tylnie nastawne położenie o skok s_{pl} ; szybkość wycyfowania ślimaka, a więc i czas uplastyczniania tworzywa, zależą od ciśnienia hydraulicznego p_{Hpl} , zwanego przeciwcisnieniem w cylindrze hydraulicznym. Od nastawnej drogi s_{pl} zależy ilość pobranego tworzywa, które po uplastycznieniu przygotowane jest do wtryskiwania w następnym cyklu.

5-6: Odsunięcie cylindra wtryskowego.

6-7: Zakończenie czasu chłodzenia t_{ch} wypraski, trwającego w rzeczywistości od punktu 3 diagramu, ale nastawianego najczęściej od chwili zakończenia docisku, tj. punktu 2.

7-8: Otwarcie formy. W trakcie otwierania formy siłownik wypychaczy 14 lub zderzak wtryskarki uruchamia wypychacze formy i wypraska zostaje usunięta z gniazda formy.

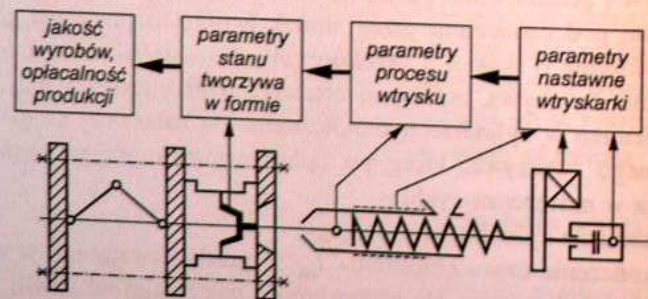
8-9: Do czasu rozpoczęcia następnego cyklu, w przypadku pracy automatycznej, trwa ustawiony czas t_p przerwy.

Oprócz przedstawionego cyklu we wtryskarkach są stosowane inne cykle technologiczne:

- z odsuwaniem cylindra po uplastycznieniu tworzywa, w celu uniknięcia przechłodzenia dyszy i przenikania ciepła do formy;
- bez odsuwania cylindra, dla form z gorącym układem wlewowym; z opóźnionym uplastycznianiem, dla tworzyw o niskiej odporności termicznej;
- z obracającymi się ślimakami w czasie wtryskiwania lub docisku, w celu zmniejszenia przepływu wstecznego tworzywa, jeśli nie jest stosowana końcówka ślimaka z zaworem zwrotnym;
- z dekompresją dozowania, w celu zapobieżenia wyciekowi tworzywa z dyszy otwartej;
- z przerwą w ruchu otwierania i zamykania formy, w celu wyciągnięcia lub wykręcenia niezależnie napędzanych elementów formy, np. rdzeni bocznych;
- wielokrotnego ruchu wypychania, w przypadku trudności usuwania wypraski;
- z doprasowaniem, w przypadku produkcji np. soczewek w formach zamykanych teleskopowo;
- intruzji, tj. powolnego napełniania formy uplastycznianym w sposób ciągły tworzywem, w przypadku bardzo grubych ścianek wypraski.

3.3.3.2. Parametry procesu

Podczas cyklu wtryskiwania następuje zamiana parametrów nastawnych wtryskarki na parametry procesu wtryskiwania, dotyczące stanu tworzywa w cylindrze wtryskarki, a następnie w formie. Te ostatnie są określane jako parametry stanu tworzywa w formie. Przemianę parametrów wyjaśniono na rys. 3.60.

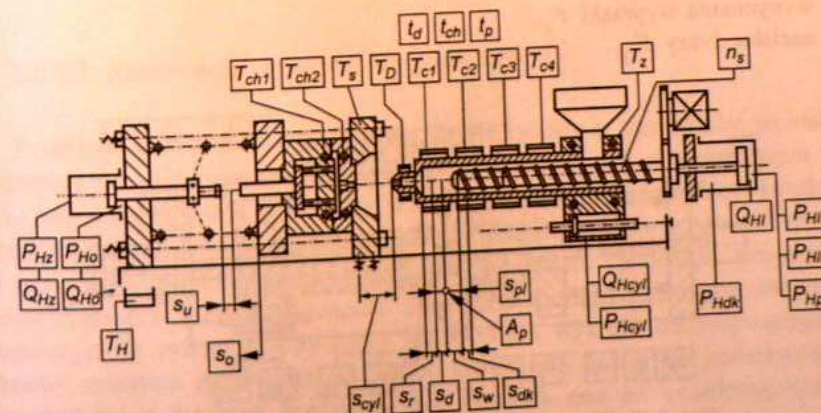


Rys. 3.60. Przemiana parametrów w czasie procesu wtryskiwania

Parametry nastawne i parametry procesu wtryskiwania

Odróżnienie parametrów nastawnych było bardziej wyraźne w starych typach maszyn, gdzie nastawy wymagały odczytu wskazań manometru, ustawiania krzywek łączników drogowych, czy stosowania pokręteł przekaźników czasowych. Do podstawowych parametrów nastawnych wtryskarki należą (rys. 3.61):

- czas:
 - docisku t_d ,
 - chłodzenia t_{ch} ,
 - przerwy t_p ;
- temperatura:
 - cieczy obiegów regulacji temperatury formy T_{ch1} , T_{ch2} ,
 - grzejników cylindra i dyszy $T_{c1..4}$, T_D ,
 - obsady cylindra T_z ,
 - stołów T_s ,
 - oleju napędowego T_H ;
- droga:
 - skok wypychania s_u ,
 - otwarcia s_o ,
 - zabezpieczenia s_{bezp} ,
 - dozowania (uplastyczniania) s_{pl} ,
 - wtryskiwania s_w ,
 - docisku s_d ,
 - dekompresji s_{dk} ,
 - grubości poduszki reszkowej s_r ,
 - dosunięcia cylindra s_{cyl} ;
- prędkość obrotowa ślimaka n_s ;
- ciśnienie p i wydatek oleju Q przy:
 - zamykaniu formy p_{Hz} , Q_z ,
 - zabezpieczaniu formy p_{Hbezp} , Q_{Hbezp} ,
 - otwieraniu formy p_{Ho} , Q_{Ho} ,

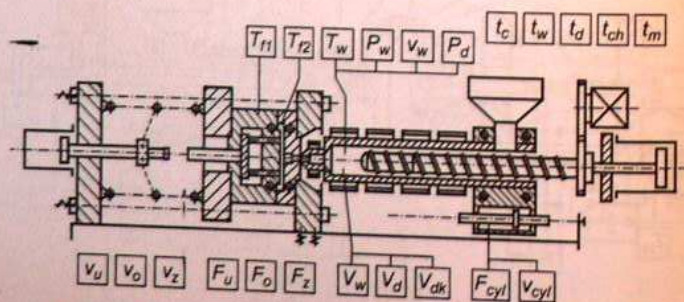


Rys. 3.61. Parametry nastawne wtryskarki

dosuwaniu i otwieraniu cylindra p_{Hcyl} , Q_{Hcyl} ,
 wtryskiwaniu (pierwszy stopień ciśnienia) p_{H1} , Q_{H1} ,
 docisku (drugi stopień ciśnienia) p_{HII} , Q_{HII} ,
 dekompresji p_{Hdk} ,
 przeciwcisnieniu (dozowaniu, uplastycznianiu) p_{Hpl} .

W wyniku ustawienia powyższych parametrów wtryskarki uzyskuje się parametry wtryskiwania (rys. 3.62), które są parametrami wynikowymi, zależnymi również od budowy wtryskarki:

- czasy:
 - cyklu t_c ,
 - wtryskiwania t_w ,
 - docisku t_d ,
 - chłodzenia t_{ch} ,
 - maszynowe, tj. poszczególne czasy otwierania i zamykania formy oraz dosuwania i odsuwania cylindra t_m ;
- temperaturę:
 - strefy formy T_{f1} , T_{f2} ,
 - wtryskiwania (tj. tworzywa w cylindrze) T_w ;
- objętość V i ciśnienie tworzywa p :
 - wtryskiwania V_w , p_w ,
 - docisku V_d , p_d ,
 - dekompresji V_{dk} ;
- prędkość:
 - wtryskiwania v_w ,
 - zamykania formy v_z ,
 - otwierania formy v_o ,
 - wypychania wypraski v_u ,
 - dosuwania i odsuwania cylindra v_{cyl} ;
- siły:
 - zamknięcia formy F_z ,
 - otwarcia formy F_o ,
 - wypychania wypraski F_u ,
 - nacisku dyszy F_{cyl} .



Rys. 3.62. Parametry procesu wtryskiwania tworzywa do formy

Parametry stanu tworzywa w formie

Tworzywo wtrysnięte do formy stygnie w niej w określonym czasie t_{ch} i pod stale zmniejszającym się ciśnieniem przyjmuje wymagany kształt, określony gniazdem formy.

Przemiany tworzywa zachodzące w samej formie wtryskowej określone są już tylko trzema parametrami stanu tworzywa uzależnionymi od siebie, zmieniającymi w czasie i w przestrzeni gniazda formy aż do zastygnięcia wypraski:

- przebieg zmian ciśnienia $p_f(T_f, v_f)$
- przebieg zmian temperatur $T_f(p_f, v_f) (t)(x, y, z)$
- szybkość płynięcia $v_f(p_f, T_f)$

Wielkości te są wzajemnie zależne i zmiana którejkolwiek z nich, powodując zmianę lepkości tworzywa, powoduje również zmianę pozostałych. Są ponadto zmienne w czasie i różne w każdym miejscu wypraski. Bezpośrednia kontrola tych parametrów w formie produkcyjnej jest najczęściej niemożliwa, stąd też stosuje się kontrolę i regulację pośrednią parametrów wtryskiwania lub nawet parametrów nastawnych.

Aby przybliżyć zasadę zamiany parametrów – również ze względów terminologicznych – można posłużyć się poniższym przykładem:

stan tworzywa w formie	←	parametr wtryskiwania	←	parametr nastawny
forma		cylinder wtryskowy		silownik hydrauliczny
$p_f \leftarrow \begin{cases} \text{ciśnienie wtryskiwania } p_w & \leftarrow p_{H1} \\ \text{ciśnienie docisku } p_d & \leftarrow p_{H2} \\ \text{ciśnienie uplastyczniania } p_{pl} & \leftarrow p_{Hpl} \end{cases}$				

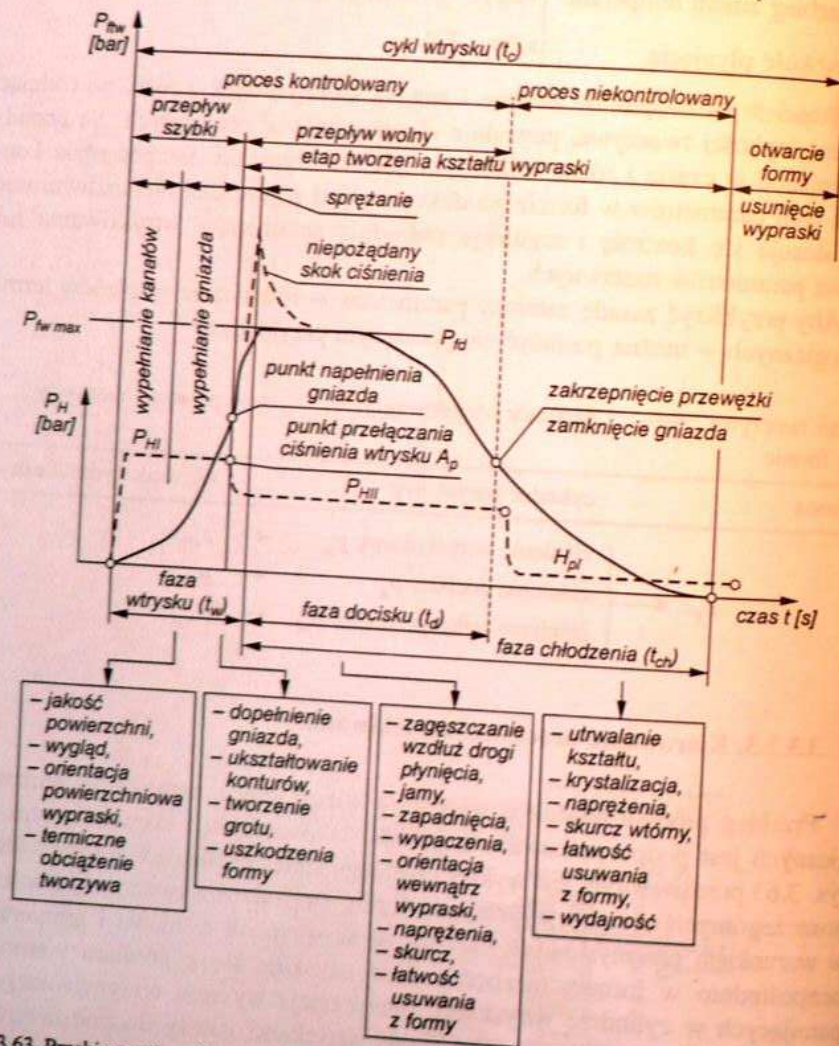
3.3.3.3. Kierowanie procesem wtryskiwania

Przebieg procesu produkcji wyrobu, a więc każdy z parametrów technologicznych jest podporządkowany kryteriom jakościowym i ekonomicznym. Na rys. 3.63 przedstawiony jest wykres przebiegu zmian ciśnienia w formie podczas poszczególnych operacji wypełniania formy i chłodzenia tworzywa. Ponieważ w warunkach przemysłowych nie stosuje się pomiaru ciśnienia i temperatury bezpośrednio w formie, niezbędne dane uzyskuje się z pomiaru warunków panujących w cylindrze wtryskarki. Interpretacja wykresu otrzymywanego na ekranie monitora sterownika (rys. 3.64) wtryskarki należy do podstawowych umiejętności technologa wydzielowego. Pozwala ona na świadomą korektę

parametrów. Poniżej odniesiono parametry procesu i podane w nawiasach parametry nastawne do podstawowych operacji procesu.

Wypełnianie formy

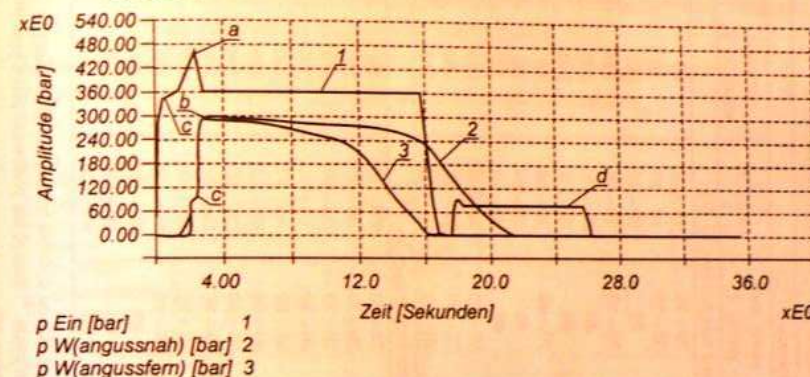
- Ciśnienie wtryskiwania p_w (ciśnienie hydrauliczne p_{H1}). Zależy jest od lepkości tworzywa i długości drogi płynięcia. Jak widać na rys. 3.65, największe straty ciśnienia na drodze płynięcia występują w otworze dyszy wtryskarki i przewężce układu wlewowego. Wysokość p_w ustala się zależnie od p_{fmin} , czyli od charakterystycznego dla danych warunków płynięcia minimalnego ciśnienia pozwalającego na całkowite wypełnienie gniazda formy.



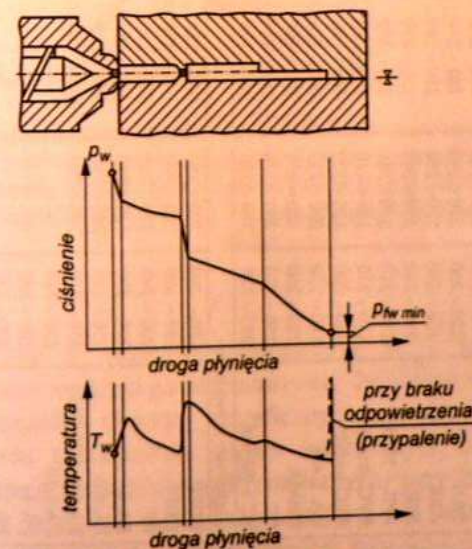
Rys. 3.63. Przebieg zmian ciśnienia tworzywa w formie i ciśnienia hydraulicznego oleju odniesiony do poszczególnych operacji procesu

- Temperatura tworzywa T_w (temperatury cylindra i dyszy T_{C1} , T_{CII} , ..., T_D). Zarówno w otworze dyszy, jak i w przewężce gwałtownie wzrasta temperatura tworzywa oraz prędkość płynięcia; następuje wtedy korzystne obniżenie lepkości ułatwiające wypełnienie gniazda. W skrajnym przypadku, w tych miejscach może wystąpić nawet przegrzanie i degradacja termiczna tworzywa. Znaczny wzrost ciśnienia zamkniętego w formie powietrza (przy braku odpowietrzeń) może w wyniku tzw. efektu Diesla spowodować zwęglenie tworzywa (rys. 3.65). Zalecane temperatury podano w tabl. 3.5.

Date : D:\DATAFLOW\KIMWPR1.WAV
Datum : 07/03/91
Schuss : 1



Rys. 3.64. Rzeczywisty przebieg zmian ciśnienia tworzywa (przykładowy obraz na monitorze w jęz. niemieckim): 1 - przed czołem ślimaka, 2 - w formie blisko miejsca wtryskiwania, 3 - daleko od miejsca wtryskiwania; a - nastawne ciśnienie wtryskiwania, b - ciśnienie wtryskiwania w formie, c - punkt przełączania, d - ciśnienie uplastyczniania



Rys. 3.65. Przebieg zmian ciśnienia i temperatury tworzywa na drodze płynięcia w formie

Temperatury stosowane przy wtryskiwaniu tworzyw termoplastycznych

temperatury stosowane przy wtryskiwaniu tworzyw termoplastycznych

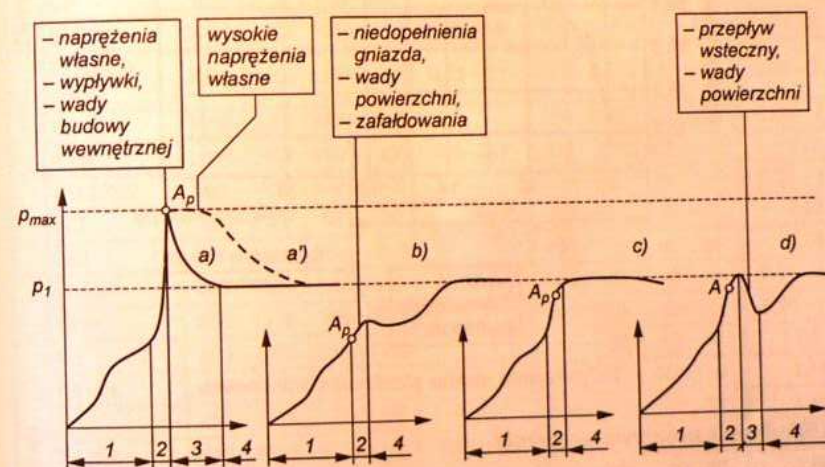
Tworzywa termoplastyczne	Temperatura [°C]					formy T_f	usuwania wypraski T_u	obniżenia przy przerwie 5 – 10 min	Uwagi technologiczne
	wtryskiwania T_w	strefy ogrzewania		strefy zasypki powyżej T_c	Dopuszczalne wahania temperatury 2 – 5°C				
		dysza T_d	przód cylindra						
Amorficzne									
PS	190 – 280	220 – 240	180 – 230	150 – 180	20 – 30	10 – 50	80	230	
SB	190 – 280	220 – 240	180 – 230	150 – 180	20 – 30	10 – 50	90	230	2)
SAN	220 – 260	210 – 240	210 – 240	180 – 210	40	30 – 80	110	200	2)
ABS	220 – 250	220 – 250	210 – 240	200 – 230	30 – 50	30 – 80	100	200	2)
PPE	270 – 310	320 – 340	320 – 330	250 – 270	40	80 – 105	200	190	1)
PPE + 30 WS	270 – 310	320 – 340	320 – 330	250 – 270	40	70 – 120	210	190	1)
PVC twardy	170 – 210	170 – 210	160 – 190	140 – 160	30 – 40	20 – 60	80	100	1), 3), 4)
PVC miękki	140 – 200	170 – 200	160 – 190	140 – 160	40	20 – 60	60	100	1), 3)
CA, CAB	180 – 220	200 – 220	200 – 220	180 – 200	40	40 – 80	80	160	1), 2)
PMMA	220 – 260	200 – 250	200 – 250	140 – 170	50 – 60	40 – 80	130	160	1), 2), 3), 4)
PC	280 – 320	260 – 320	260 – 320	230 – 260	70 – 90	80 – 120	140	220	2)
PC + 30 WS	280 – 320	260 – 320	260 – 320	230 – 260	70 – 90	80 – 120	150	220	2)
Częściowo krystaliczne									
LDPE	180 – 260	200 – 250	220 – 260	150 – 230	20 – 30	20 – 50	80	240	
HDPE	180 – 300	220 – 300	220 – 270	200 – 250	20 – 30	20 – 50	110	260	
PP	200 – 260	240 – 260	220 – 250	150 – 210	20 – 30	20 – 80	110	250	
PA 6	240 – 270	230 – 250	240 – 260	210 – 230	60 – 80	60 – 90	200	220	2), 5)
PA 6.6	250 – 320	260 – 280	260 – 280	240 – 260	60 – 80	50 – 90	230	260	2), 5)
PA 6.6 + 30 WS	250 – 320	260 – 280	260 – 280	240 – 260	60 – 80	80 – 120	240	260	2), 5)
PA 6.10	230 – 280				60 – 80	30 – 60	200	220	2), 5)
PA 11	200 – 250				60 – 80	20 – 100	170	200	2), 5)
PA 12	200 – 250				60 – 80	20 – 100	160	200	2), 5)
POM	190 – 220	170 – 215	170 – 205	150 – 180	30 – 40	50 – 120	150	150	1), 5)
PET	260 – 280	250 – 270	240 – 260	230 – 250	80	90 – 120	210	210	1)
PBT	250 – 280	240 – 265	230 – 260	230 – 245	60	80 – 120	200	200	1)
PBT + WS	250 – 280	240 – 265	230 – 250	230 – 245	60	80 – 120	210	200	1)

Szczegółowe zalecenia podają producenci tworzyw. Występują duże różnice w zależności od dodatku środków modyfikujących.

Uwagi: ¹⁾ Człony termiczne, górny zakres temperatur tylko przy krótkich czasach cyklu. ²⁾ Suszyć lub poduszać przed przetworstwem. ³⁾ Stosować tylko dysze otwarte.

⁴⁾ Nie stosować zaworu zwrotnego ślimaka. ⁵⁾ Nie stosować dysz zamykanych tłoczkowych.

- Szybkość wtryskiwania v_w (wydatek oleju Q_{Hw}) ustawiana jest tak, aby zachować stałą szybkość płynięcia czoła strumienia tworzywa w gnieździe. Programowany profil zmian szybkości jest proporcjonalny do kolejnych przekrojów wypraski na drodze płynięcia. Przy dużej szybkości wtryskiwania może nastąpić gwałtowny wzrost ciepła tarcia w przewężce kanału wlewowego.
- Punkt przełączania. Jego właściwe ustawienie pozwala na usunięcie efektu gwałtownego skoku ciśnienia wtryskiwania p_w , który następuje w chwili zapelnienia gniazda formy (rys. 3.66a). Obniżenie tego ciśnienia zapobiega powstawaniu wypływek i zwiększa żywotność formy (rys. 3.66c). Punkt przełączania ustawia się doświadczalnie; dużą pomocą jest obserwacja wykresu zmian ciśnień na monitorze wtryskarki.
- Czas wtryskiwania t_w . Związany jest z szybkością wtryskiwania.
- Pojemność wtryskiwania V_w (droga przesuwu ślimaka s_w).

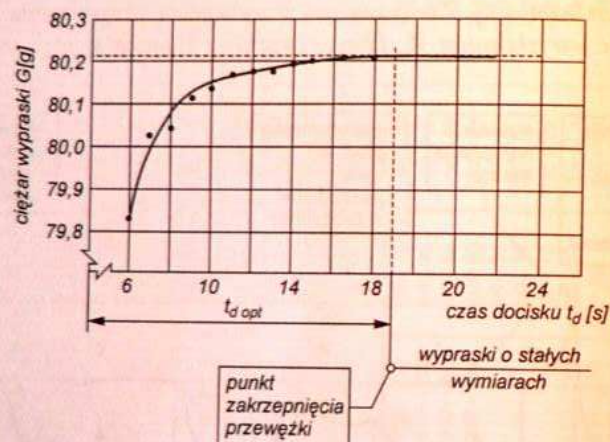


Rys. 3.66. Efekty zmian ciśnienia w formie zależnie od ustawienia punktu przełączenia A_p : a) za późne przełączanie, a') chłodzenie pod wysokim ciśnieniem, b) za wcześnie przełączanie, c) właściwie ustawione przełączanie, d) właściwie ustawione przełączanie, za dużą bezwładność zaworu hydraulicznego; 1 – wtrysk, 2 – sprężanie, 3 – wyrównywanie ciśnień, przepływ wsteczny, 4 – docisk

Docisk

- Ciśnienie docisku p_d (ciśnienie hydrauliczne p_{HII}). Ma na celu ciągłe uzupełnianie strat kurczącego się tworzywa. Przebiega według ustalonego profilu. W przypadku tworzyw amorficznych ustawiane jest jako wartość malejąca w celu zmniejszenia udziału zamrożonych naprężeń własnych; w przypadku tworzyw częściowo krystalicznych, przy których ze względu na parokrotnie większy skurcz objętościowy nie występuje możliwość powstania naprężeń tego typu, ustawiane jest jako wartość stała.

- Czas docisku t_d . Powinien trwać do momentu zastygnięcia kanałów doprowadzających (przewężki). Zbyt krótki, podobnie jak zbyt niskie ciśnienie docisku, jest przyczyną jam i zapadnięć. Jeśli jednak wady te są nie do usunięcia, ich przyczyną może być zbyt mała przewężka lub zła konstrukcja wypraski. Coraz częściej poprawność ustawienia tego czasu kontroluje się metodą wagową. Brak przyrostu ciężaru wypraski oznacza, że nastąpiło zakrzepnięcie przewężki (rys. 3.67) i dalsze przedłużanie czasu docisku jest zbyteczne. Czas i ciśnienie docisku wpływają na wielkość skurczu, a więc i dokładność wymiarową wyprasek. Zalecane wartości ciśnień podano w tabl. 3.6.
- Droga docisku s_d – droga przesuwu ślimaka w czasie docisku.



Rys. 3.67. Wagowa metoda określania czasu docisku

Chłodzenie tworzywa w formie

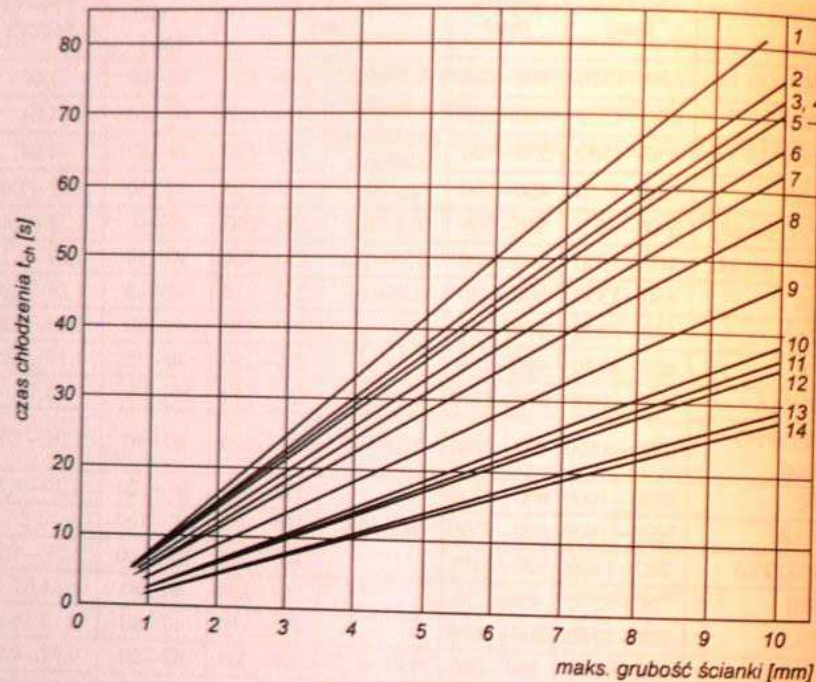
- Temperatury formy $T_{f1}, T_{f2}, \dots$ – temperatura obiegów termostatu lub wody z obiegu przemysłowego $T_{ch1}, T_{ch2}, \dots$. Wypraski techniczne wymagają powolnego chłodzenia, a więc wysokiej temperatury formy. Wypraski masowe, np. opakowania, wymagają ze względów ekonomicznych szybszego schładzania. We wszystkich przypadkach utrzymanie stałej regulowanej temperatury formy jest podstawową zasadą produkcji o ustalonej jakości. Forma nie może rozpoczynać pracy, zanim nie osiągnie określonej temperatury pracy.
- Temperatura usuwania T_u (czas chłodzenia t_{ch}). Jest to określana doświadczalnie temperatura wypraski, przy której może być ona usunięta z formy, bez deformacji.
- Czas chłodzenia t_{ch} . Po jego upływie następuje otwarcie formy i usunięcie wypraski. Do wstępnego określenia czasu chłodzenia można zastosować zależność

$$t_{ch} = \frac{s^2}{\pi^2 a} \ln \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{T_w - T_f}{T_u - T_f} \text{ [s]}$$

Wartości ciśnienia w procesie wtryskiwania tworzyw termoplastycznych

Tworzywo		Ciśnienie wtrysku [bar]	Ciśnienie docisku [bar]	Ciśnienie w formie koło wlewu [bar]		Ciśnienie uplastyczniania [bar]	Ciężar właściwy [g/cm ³]
Tworzywa amorficzne	PS	650 – 1550	300 – 700	0,75 – 0,5 × najwyższy poziom ciśnienia docisku	150 – 350	40 – 80	1,05
	SB	650 – 1550	350 – 800		200 – 400	40 – 80	1,04
	SAN	650 – 1550	350 – 900		250 – 450	40 – 80	1,08
	ABS	650 – 1550	400 – 900		300 – 550	40 – 80	1,03 – 1,07
	PVC twardy	1000 – 1550	500 – 900	0,6 – 0,4	250 – 500	40 – 80	1,38 – 1,40
	PVC miękki	400 – 1550	300 – 600	0,75 – 0,5	150 – 300	40 – 80	1,20 – 1,35
	CA	650 – 1350	300 – 650	0,85 – 0,7	250 – 450	40 – 80	1,26 – 1,32
	CAB	650 – 1350	300 – 900	0,75 – 0,5	250 – 450	40 – 80	1,16 – 1,22
	CP	650 – 1350	400 – 700		200 – 350	40 – 80	1,19 – 1,23
	PMMA	1000 – 1400	500 – 1150	0,6 – 0,4	350 – 550	80 – 120	1,18
	PPE/PPO mod	1000 – 1600	600 – 1200	0,75 – 0,5	350 – 600	60 – 90	1,06 – 1,10
	PC	1000 – 1600	600 – 1300	0,6 – 0,4	350 – 650	80 – 120	1,20 – 1,24
	PAR	1000 – 1600	600 – 1300		350 – 650	80 – 120	1,2
	PSU/PES	900 – 1400	500 – 1100		400 – 600	80 – 120	1,27 – 1,37
Tworzywa częściowo krystaliczne	PEI	750 – 1500	400 – 750	0,85 – 0,7	350 – 650	40 – 80	1,87
	PAI	759 – 1550	500 – 1050		450 – 750	40 – 80	1,38
	LDPE	600 – 1350	300 – 800	0,85 – 0,7	200 – 600	40 – 80	0,91 – 0,93
	HDPE	600 – 1350	300 – 800	0,75 – 0,5	200 – 600	60 – 90	0,94 – 0,96
	PP	800 – 1400	500 – 1100		300 – 650	60 – 90	0,9
	PA 4.6	650 – 1550	550 – 1050	0,85 – 0,7	450 – 750	40 – 80	1,18
	PA6	450 – 1550	400 – 750		350 – 550	40 – 80	1,13
	PA 6.6	650 – 1550	550 – 1050		450 – 750	40 – 80	1,14
	PA 6.10	450 – 1550	350 – 750		300 – 500	40 – 80	1,06
	PA 11	450 – 1550	400 – 800		350 – 550	40 – 80	1,04
	PA 12	550 – 1550	450 – 1000	0,75 – 0,5	350 – 550	60 – 90	1,02
	PA amorf.	900 – 1300	450 – 800		350 – 450	60 – 90	1,12
	POM	800 – 2000	700 – 1500	0,85 – 0,7	550 – 1050	40 – 80	1,41 – 1,42
	PET	800 – 1500	550 – 1050		450 – 750	60 – 90	1,34 – 1,37
	PBT	800 – 1550	500 – 1000		300 – 700	40 – 80	1,29
	PPS	750 – 1500	400 – 750		350 – 650	40 – 80	1,34
	FEP	1000 – 1500	500 – 1000	0,6 – 0,4	300 – 600	80 – 120	2,14 – 2,17
	ETFE	1000 – 1500	500 – 1000		300 – 600	80 – 120	1,70
	PAA	1000 – 1500	350 – 800	0,85 – 0,7	300 – 700	40 – 80	1,43 – 1,64
	PPA	700 – 1500	350 – 800		300 – 700	40 – 80	1,26 – 1,56
	PAEK	800 – 1500	450 – 800	0,85 – 0,7	400 – 700	60 – 90	1,27 – 1,41
	LCP	400 – 1500	350 – 100		300 – 800	40 – 80	1,1 – 1,8

gdzie: s – grubość ścianki wypraski [cm], a – współczynnik przewodzenia temperatury [cm^2/s], lecz dotyczy ona wyłącznie czasu chłodzenia w idealnych warunkach płaskiej, prostokątnej płytki. W praktyce stosuje się wzory empiryczne lub np. wykres z rys. 3.68.



- | | |
|---------------------------|---|
| 1 – PP (40°)/PET/PF A/PEP | 8 – PPO/PA 6 10/PTMT/PUR-Hytrel/PET-GV/Peek |
| 2 – POM-Hostaform (100°) | 9 – Dyflor 2000/PC (90°)/PES/SAN |
| 3 – PA-amorficzny (70°) | 10 – PA 6 (100°)/PA 11-GV (90°); PSV |
| 4 – PA/HDPE/TPX | 11 – PMMA/ABS/PBT-GV/Vab-GV |
| 5 – POM-Delrin (100°) | 12 – PA 66 (100°)/PES-GV |
| 6 – PS (50°)/PVC | 13 – PA 66-GV 35% (100°)/PPS/ABS-GV |
| 7 – SB (60°) | 14 – PC-GV (100°), PC (60°)/PA 12-GV (60°) |

Rys. 3.68. Diagram do wstępnego określania czasu chłodzenia zależnie od największej grubości ścianki wypraski (w nawiasach podano temperaturę formy); GV – włókno szklane

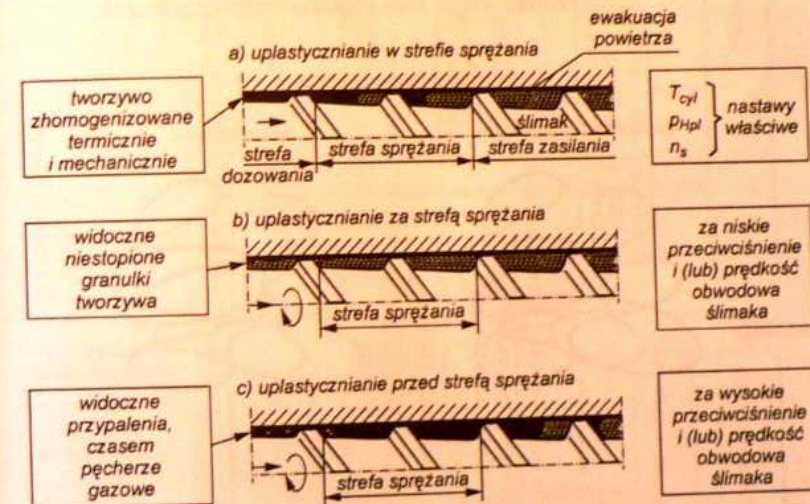
Uplastycznianie i homogenizacja tworzywa

- Ciśnienie uplastyczniania p_{pl} (przeciwcisnienie p_{Hpl}). Ustawienie dławienia oleju wpływającego z siłownika powoduje wytwarzanie poduszki olejowej, przeciwdziałającej ciśnieniu tworzywa przed czołem ślimaka p_{pl} i zbyt szybkiemu wycofaniu ślimaka. Za niska wartość p_{Hpl} spowoduje opóźnione i niecałkowite uplastycznianie (granulki w masie tworzywa), za wysoka p_{Hpl} może być przyczyną zbyt szybkiego uplastyczniania i przegrzania materiału (rys. 3.69).
- Obróty ślimaka n – wartość współzależna od p_{Hpl} i T_w . Wzrost obrotów przyspiesza uplastycznianie tworzywa, występują większe naprężenia ściskające powodujące wzrost temperatury tworzywa.

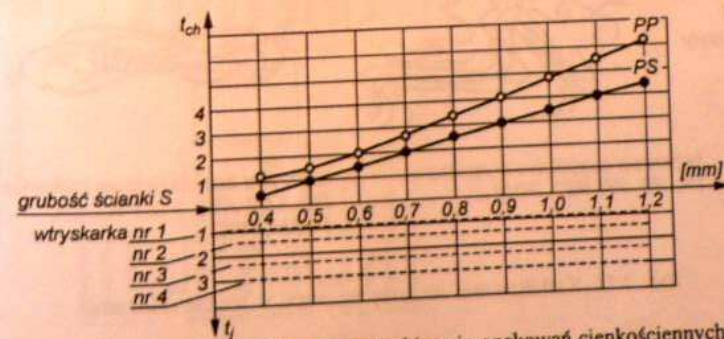
- Czas uplastyczniania t_{pl} – wartość wynikowa.
- Droga dozowania s_{pl} – wartość łączna $s_{pl} = s_w + s_d$.

Czas cyklu i przerwy

- Czas przerwy t_p . Jest to czas na usunięcie wypraski z formy oraz czynności pomocnicze, jak np. zakładanie zaprasek;
- Czas cyklu t_c . Powtarzalność czasu cyklu decyduje o stabilności termicznej parametrów procesu; wstępne określenie tego czasu wg zależności $t_c = t_{ch} + t_p + t_j$ wykorzystuje się do ustalenia założeń techniczno-ekonomicznych i projektu procesowego. W przypadku produkcji automatycznej można założyć, że czas przerwy przy zastosowaniu przyspieszonego usuwania wyprasek przez robot, zostaje ograniczony do ułamka sekundy. Wówczas $t_c = t_{ch} + t_j$. Wyjaśnia to przykład na rys. 3.70.



Rys. 3.69. Proces uplastyczniania tworzywa w strefie sprężania ślimaka: a) prawidłowy, b) opóźniony, c) przedwczesny

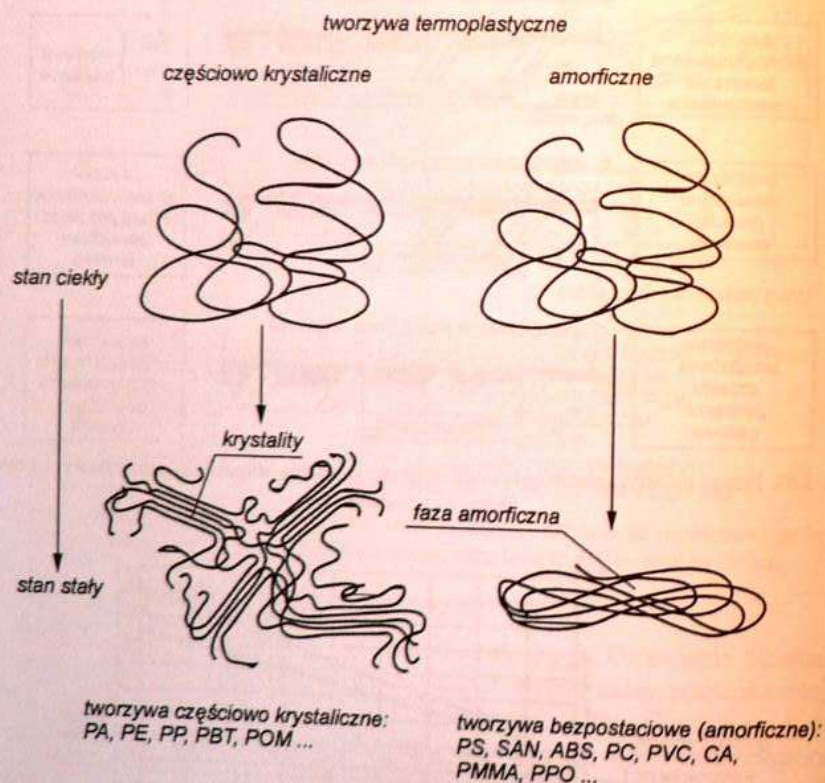


Rys. 3.70. Analiza wstępna czasu cyklu przy wtryskiwaniu opakowań cienkościennych. Przykład: dla wypraski z PP o grubości ścianki 0,6 mm, produkowanej na wtryskierce nr 4, łączny czas cyklu wyniesie $t_c = t_{ch}' + t_j = 3 + 2 = 5$ s

3.3.4. ZJAWISKA ZACHODZĄCE W FORMIE W CZASIE PROCESU WTRYSKIWIANIA

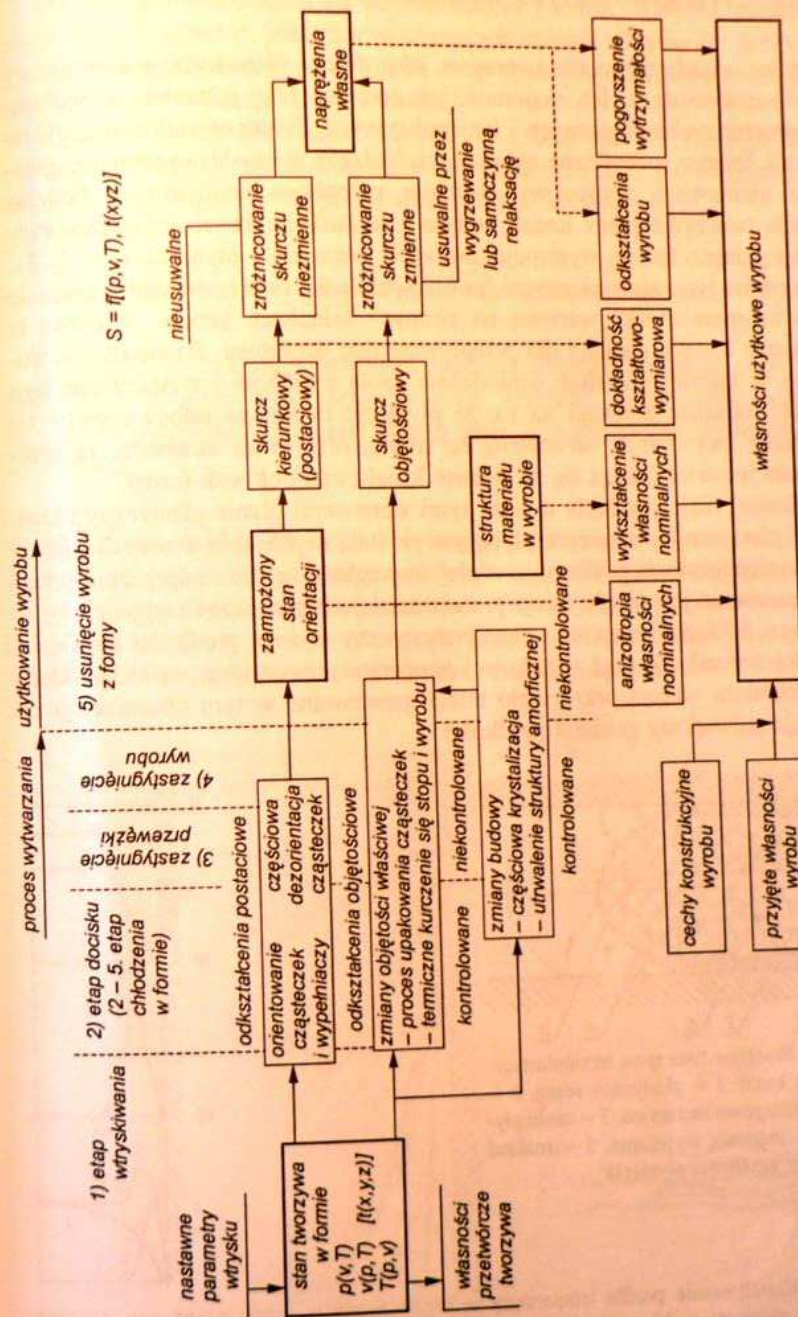
W stanie ciekłym zarówno tworzywa amorficzne, jak i częściowo krystaliczne mają strukturę amorficzną. Doprowadzona do cząsteczek energia cieplna (T_u) pozwala na ich przemieszczanie pod wpływem ciśnienia (p_u) z określoną szybkością (v_u) (rys. 3.71). Kształtowanie cech jakościowych wyrobu jest podporządkowane określonym procesom fizycznym:

- w czasie płynięcia – orientacji cząsteczek w gnieździe formy,
- czasie stygnięcia – zamrożeniu ostatecznego stanu orientacji,
- kształtowaniu struktury molekularnej,
- zamrożeniu, występującego pod wpływem ciśnienia resztkowego, stanu upakowania cząsteczek.



Rys. 3.71. Kształtowanie struktury wypraski w trakcie chłodzenia

W wyniku tego zostaje ukształtowany w wyrobie zespół cech wewnętrznych wpływających na wszystkie własności użytkowe wypraski (rys. 3.72).



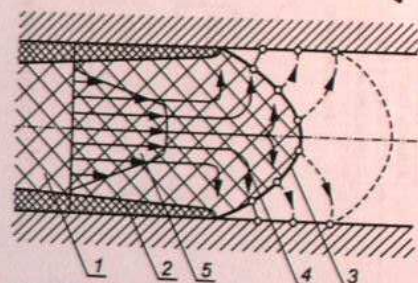
Rys. 3.72. Kształtowanie własności wyprasek w procesie wtryskiwania

3.3.4.1. Przepływ tworzywa w formie

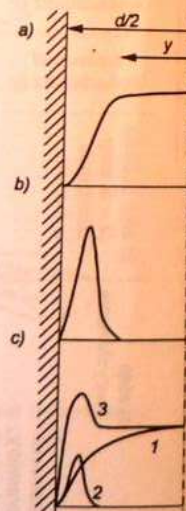
Ogólne zasady płynięcia tworzywa jako cieczy nienewtonowskiej zostały omówione w rozdz. 1. Ich znajomość jest coraz częściej potrzebna w codziennych pracach technologicznych i konstrukcyjnych. Proces wtryskiwania charakteryzują jeszcze specyficzne zjawiska zachodzące w czasie wypełniania gniazda, a mianowicie warstwowy charakter przepływu laminarnego. Podczas płynięcia tworzywa przez kanał, którym jest zarówno kanał doprowadzający jak też i gniazdo formy, występuje tzw. *efekt fontannowy* płynięcia (rys. 3.73). Polega on na tym, że w pierwszej fazie wypełniania, tworzywo wpływające do kanału krzepnie cienką warstwą na zimnych ściankach kanału. Warstwa ta spełnia rolę izolacji cieplnej dla przepływającego tworzywa. Powietrze znajdujące się w kanale powoduje ochłodzenie czoła płynięcia i zwiększenie jego lepkości. Jednakże z uwagi na to, że płynięcie tworzywa odbywa się w tej fazie przez „wywijanie” strumienia ze środka rdzenia na zewnątrz, ta przechłodzona warstwa osadza się na ściance kanału obu połówek formy.

W drugiej fazie płynięcia między tymi warstwami płynie plastyczny rdzeń. Między plastycznym rdzeniem płynącym ze stałą szybkością a warstwą izolacyjną występuje strefa poślizgu, a w niej ze względu na duże naprężenia ścinające generowane jest ciepło tarcia przeciwdziałające procesowi stygnięcia.

Na rys. 3.74 przedstawiono charakterystyczny wykres prędkości płynięcia, prędkości ścinania $\dot{\gamma}$ oraz wynikowej temperatury tworzywa, na którą składa się temperatura własna oraz ciepło tarcia generowane w tym obszarze, gdzie występuje największy gradient prędkości.



Rys. 3.73. Przepływ tworzywa termoplastycznego przez kanał: 1 – plastyczny rdzeń, 2 – warstwa poślizgowo-izolacyjna, 3 – czoło płynięcia, 4 – kierunek wywijania, 5 – rozkład szybkości płynięcia



Rys. 3.74. Kształtowanie profilu temperatury w kanale formy w czasie przepływu tworzywa: a) szybkość płynięcia v , b) szybkość ścinania $dv/dy = \dot{\gamma}$, c) przebieg zmian temperatury; 1 – własna tworzywa (przewodzenie i konwekcja), 2 – ciepło tarcia, 3 – całkowita temperatura tworzywa

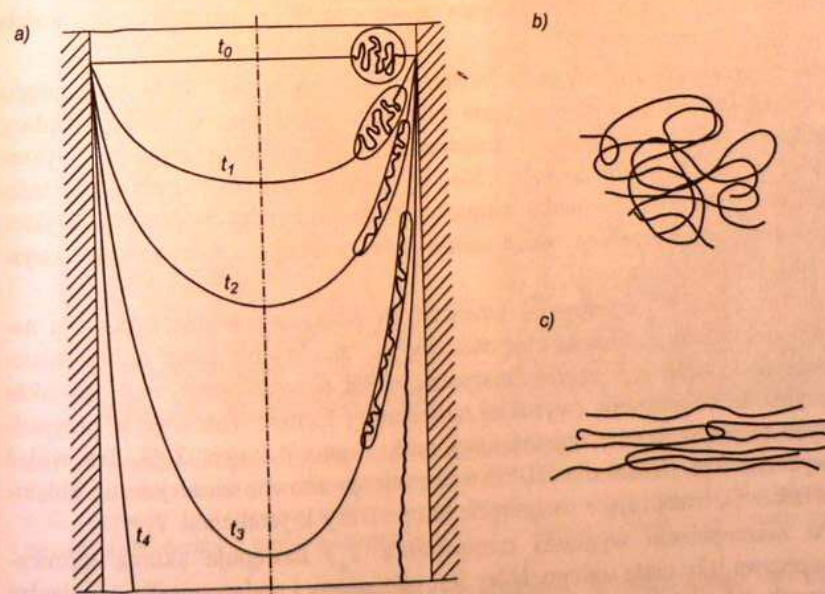
Trzecia faza rozpoczyna się po zapełnieniu gniazda. Warstwa przyścienna zwiększa swą grubość, jednakże w stygnącym rdzeniu odbywa się dalszy ruch tworzywa umożliwiający uzupełnienie strat skurczowych. Ten powolny przepływ trwa aż do zakrzepnięcia przewężki.

Późniejszym efektem różnicy szybkości chłodzenia w przekroju ścianki wypraski jest to, że zarówno opisany dalej stan orientacji, jak i ukształtowana struktura mają charakter niejednorodny, a nawet warstwowy.

3.3.4.2. Kształtowanie zespołu cech wewnętrznych wypraski

Występujący na drodze płynięcia spadek ciśnienia i temperatury w funkcji drogi i czasu (rys. 3.65) oraz zmienna szybkość wypełniania powodują, że w każdym miejscu wypraski panują inne warunki kształtowania cech wewnętrznych.

Orientacja cząsteczek, czyli układanie się ich w kierunku uprzywilejowanym – zgodnym z kierunkiem przepływu tworzywa w gnieździe. Jest przyczyną silnej anizotropii wszystkich właściwości fizycznych wypraski oraz skurczu. Na skutek naprężeń ścinających występujących w czasie przepływu łańcuchów cząsteczek są zorientowane i dodatkowo rozciągnięte (rys. 3.75). W szybko



Rys. 3.75. Przebieg powstawania struktury zorientowanej: a) rozciąganie i układanie się łańcuchów cząsteczek w czasie $t_0 - t_4$, b) cząsteczki bezładne, c) cząsteczki zorientowane

stygającej warstwie przysięsiennej wypraski stan ten zostaje natychmiast utrwalony i występuje tam bardzo silna orientacja, natomiast w rdzeniu, po ustaniu przepływu, następuje częściowy powrót do postaci skłębionej (dezorientacja). Ogólnie, skurcz w kierunku płynięcia jest większy niż w poprzek ułożenia cząsteczek. Wyjątkiem są tworzywa zawierające wypełniacze włókniste, gdzie występuje zależność odwrotna ze względu na tłumienie skurczu spowodowane kierunkiem ułożenia włókien. Skurcz tego typu nazywany jest *skurczem kierunkowym*, odpowiada występującemu w obróbce plastycznej metali skurczowi postaciowemu. Ponieważ stan orientacji zostaje w wyprasce utrwalony, więc skurcz kierunkowy jest niezmienny w czasie. Jest on główną przyczyną występowania wypaczeń wyprasek. Zmiana parametrów wtryskiwania tylko w niewielki sposób wpływa na stan orientacji. Można tylko ewentualnie tak programować prędkość przepływu, aby orientacja była równomierna. W sposób radykalny można na nią wpływać przez odpowiednie umieszczenie miejsca wtryskiwania w fazie konstruowania formy.

Budowa strukturalna. Kształtuje się podczas ochładzania tworzywa pod ciśnieniem i z określoną szybkością. Na wytworzenie określonej struktury mają wpływ:

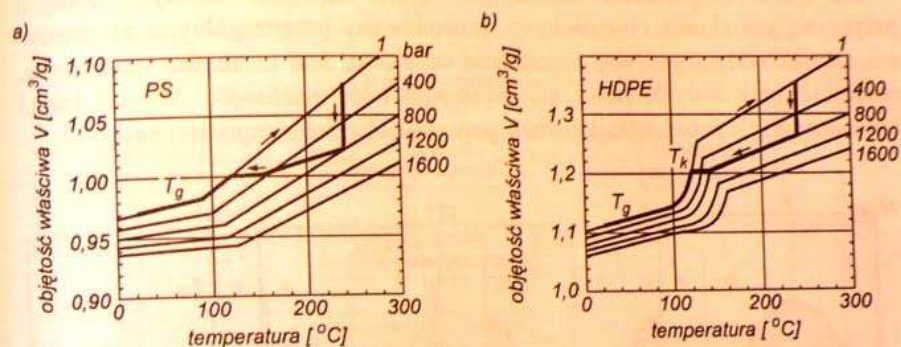
- własności tworzywa: stopień krystaliczności, szybkość krystalizacji i skłonność do tworzenia struktur drobnokrystalicznych;
- grubość ścianki wypraski, a więc szybkość odbioru ciepła;
- konstrukcja formy umożliwiająca równomierny z określoną szybkością odbiór ciepła z wypraski.

W tworzywach amorficznych w stanie płynnym aż do chwili zastygnięcia następuje *skurcz objętościowy* ciała płynnego wynoszący do 7%, a będący wynikiem zmiany upakowania cząsteczek. Jego przebieg wyjaśnia wykres $p-V-T$ przedstawiony na rys. 3.76a obrazujący przebieg zmian objętości właściwej zależnie od spadku temperatury dla różnych ciśnień. Na wykres został naniesiony przebieg zmian ciśnienia w gnieździe formy podczas wtryskiwania i ochładzania.

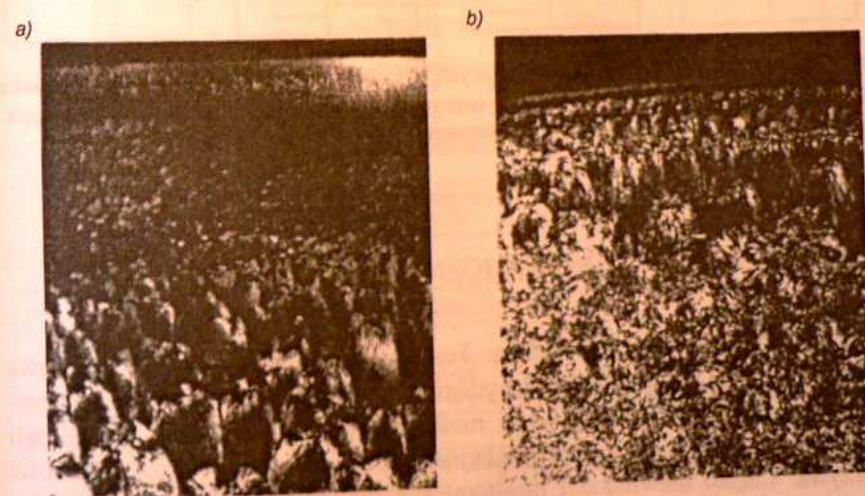
W tworzywach częściowo krystalicznych podczas przemiany fazowej następuje krystalizacja. Skurcz objętościowy jest zależny nie tylko od uzyskanego stopnia krystalizacji charakterystycznego dla danego tworzywa, lecz także od szybkości ochładzania (wysokiej temperatury formy). Tak więc w przypadku tych tworzyw skurcz objętościowy może wynosić nawet 20%. Jak widać na wykresie (rys. 3.76b) dla HDPE występuje gwałtowne zmniejszenie objętości właściwej, oznaczające osiągnięcie temperatury krystalizacji T_k .

Po zakrzepnięciu wypraski (temperatura T_g) następuje skurcz termiczny tworzywa jako ciała stałego, który jest odnoszony i podawany dla wymiarów liniowych. Wynosi on dla tworzyw amorficznych średnio 0,5%, a dla tworzyw krystalicznych, zależnie od osiągniętej krystalizacji, od 1,5 do 3,5%.

Osiągnięcie optymalnego stopnia krystalizacji jest warunkiem uzyskania przez materiał wypraski optymalnych własności fizycznych, np. wytrzymałości, współczynnika tarcia i odporności na ścieranie dla łożysk i kół zębatach. Na rys. 3.77 pokazano powiększony przekrój fragmentu łożyska z POM i wpływ podwyższenia temperatury formy na wykształcenie prawidłowej struktury w wyprasce.



Rys. 3.76. Wykresy $p-V-T$ dla tworzyw amorficznych a) i częściowo krystalicznych b) z naniesioną krzywą przebiegu procesu wtryskiwania; T_k – temperatura krystalizacji, T_g – temperatura zeszklenia

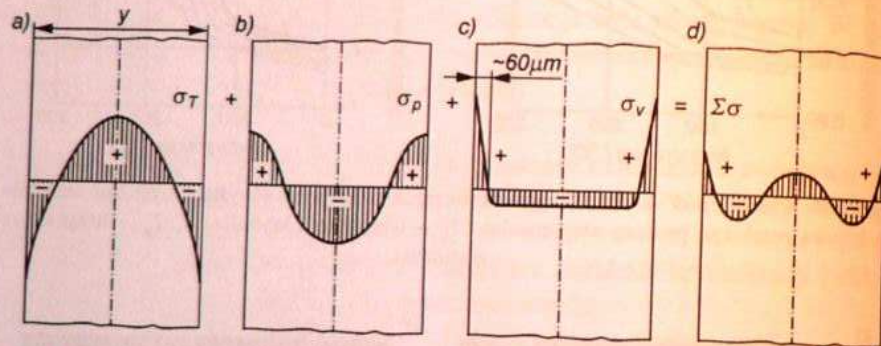


Rys. 3.77. Struktura częściowo krystaliczna 1 mm strefy brzegowej łożyska z POM (powiększenie 130x): a) nieprawidłowa przy temperaturze formy 40°C – gruba warstwa amorficzna o małej twardości i odporności na ścieranie, rozróżnione duże kryształy wewnątrz wypraski; b) właściwa przy podwyższonej temperaturze formy – drobne kryształy w całej masie wypraski

Naprężenia własne. Zróżnicowanie skurczu występującego w każdym fragmencie wypraski jest przyczyną (podobnie jak zróżnicowanie odkształceń) powstania bliżej nieokreślonego stanu naprężeń własnych w wyprasce.

W przypadku wyprasek o dużej sztywności naprężenia zostają utrwalone wewnątrz wypraski, jednakże wpływają zasadniczo na własności wytrzymałościowe materiału. Jeżeli zostaną one obniżone, np. przez oddziaływanie światła, karbu, czynników agresywnych otoczenia itp., ujawniają się w postaci mikrorys i pęknięć. W przypadku wyrobów o mniejszej sztywności dążenie do stanu równowagi spowoduje wypaczenia wyprasek.

Na rys. 3.78 pokazano sumaryczny obraz naprężeń własnych, których przyczyną jest skurcz objętościowy, powodowany poszczególnymi parametrami, tak jak oddziaływałyby niezależnie od siebie. Jest to analiza teoretyczna, ponieważ przy wtryskiwaniu nie występuje taka możliwość. Wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają jednak poprawność założeń uproszczonych.



Rys. 3.78. Powstawanie stanu naprężeń własnych w ścianie wypraski: a) naprężenia w wyniku skurczu, b) naprężenia w wyniku upakowania tworzywa, c) naprężenia powstałe w czasie płynięcia, d) stan naprężeń wypadkowych; g – grubość ścianki

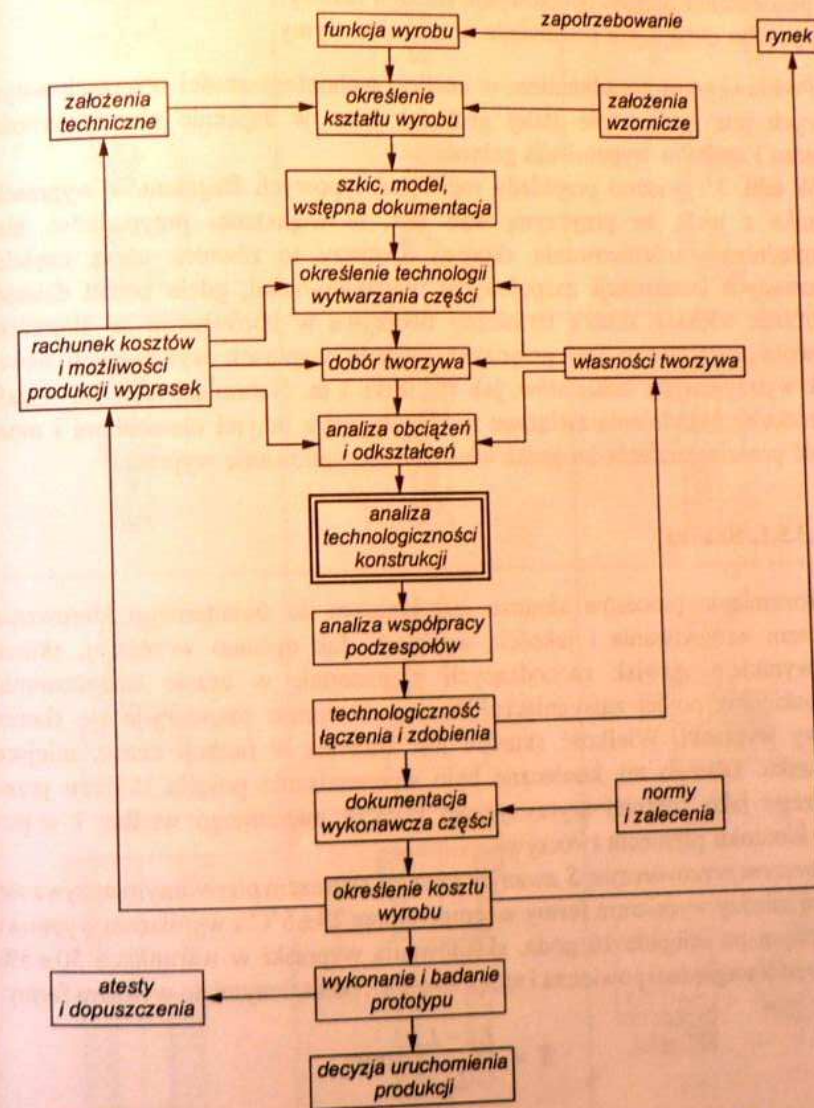
3.3.5. ZASADY TECHNOLOGICZNOŚCI WYPRASEK

Od konstrukcji wypraski zależą: koszt wykonania, trwałość i właściwa praca formy, jak również koszt i wydajność produkcji. Zgodny z przeznaczeniem kształt wyrobu wtryskowego musi uwzględniać specyfikę technologii wtryskiwania, możliwości konstrukcyjne wykonania formy oraz własności tworzywa. Często niewielkie i nieistotne dla funkcjonalności wyrobu zmiany jego konstrukcji mogą znacznie uprościć formę. Dlatego też analiza technologiczności wyrobu jest wyodrębnioną czynnością w procesie wdrażania produkcji (rys. 3.79).

Analizie technologiczności wyprasek podlegają:

- warunek stałej grubości ścian;
- lokalne pogrubienia: wzmocnienia, obrzeża, żebra, profilowanie;
- długość drogi płynięcia;

- kształt naroży;
- zaokrąglenia, promienie wewnętrzne;
- powierzchnia, linie łączenia;
- zastosowanie pochyleń (zbieżności);
- występowanie otworów bocznych;
- podcięcia i zaczepy;
- zawiasy;



Rys. 3.79. Przebieg opracowywania produkcji wyrobu z tworzywa sztucznego

- zapraski, a w tym podatność na: efekt karbu, odkształcenia pod obciążeniem;
- wypaczenia;
- osiągalna dokładność wymiarowa.

Elementem analizy technologiczności jest również określenie:

- miejsc doprowadzenia tworzywa w formie;
- głównych i pomocniczych płaszczyzn podziału;
- powierzchni pierwszoplanowych, rodzaju faktury;
- sposobu uwalniania i usuwania wyprasek z formy.

Podstawowym zagadnieniem w analizie technologiczności wyprasek wtryskowych jest zachowanie stałej grubości ścian w aspekcie równomierności skurczu i sposobu wypełnienia gniazda.

W tabl. 3.7 podano przykłady rozwiązań typowych fragmentów wyprasek. Wynika z nich, że przyczyną wad jest, w większości przypadków, nieuwzględnienie zróżnicowania skurczu. Dotyczy to również coraz częściej stosowanych konstrukcji zespolonych: tworzywo-metal, gdzie ponad dziesięciokrotnie większy skurcz termiczny tworzywa w porównaniu ze skurczem elementu metalowego jest przyczyną pęknięcia wyprasek wykonanych nawet z tak wytrzymałych materiałów, jak PC, PBT i in. Natomiast tabl. 3.8 wyjaśnia niektóre zagadnienia związane ze współpracą z innymi elementami i możliwość przeciwdziałania im przez właściwe ukształtowanie wypraski.

3.3.5.1. Skurcz

Zrozumienie procesów skurczu jest kluczem do świadomego kierowania procesem wtryskiwania i jakością wyprasek. Jak opisano wcześniej, skurcz jest wynikiem zjawisk zachodzących w materiale w czasie kształtowania wypraski oraz po jej zastygnięciu. W tym momencie rozpoczyna się skurcz liniowy wypraski. Wielkość skurczu jest zmienna w funkcji czasu, miejsca i kierunku. Dlatego też konieczne było wprowadzenie pojęcia skurczu przetwórczego jako średniej arytmetycznej skurczu mierzonego wzdłuż i w poprzek kierunku płynięcia tworzywa.

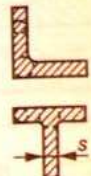
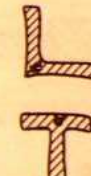
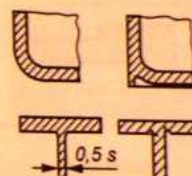
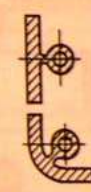
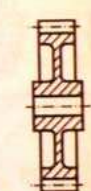
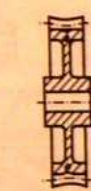
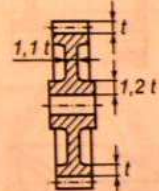
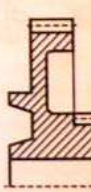
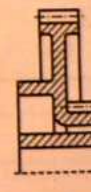
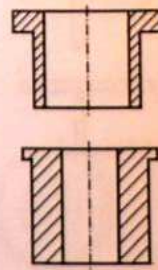
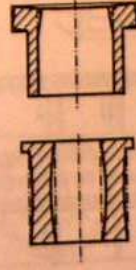
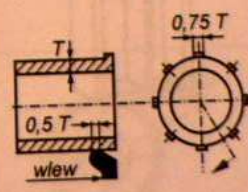
Skurczem przetwórczym S zwanym również skurczem pierwotnym nazywa się różnicę między wymiarem formy w temperaturze $23 \pm 5^\circ\text{C}$ a wymiarem wypraski mierzonym po upływie 16 godz. składowania wypraski w warunkach $50 \pm 5\%$ wilgotności względnej powietrza i temp. $23 \pm 5^\circ\text{C}$, odniesionymi do wymiaru formy:

$$S = \frac{L_F - L_T}{L_F} 100\%$$

gdzie: L_F – wymiar gniazda formy, L_T – wymiar technologiczny (produkcyjny) wypraski po 16 godz.

Tablica 3.7

Technologiczność konstrukcji wyprasek wtryskowych

Źle	Dlaczego	Jak poprawić
		
		
		
		
		

Tablica 3.7, cd.

Żele	Dlaczego	Jak poprawić

Współpraca wyprasek z innymi elementami

Źle	Dłaczego	Jak poprawić
	<	

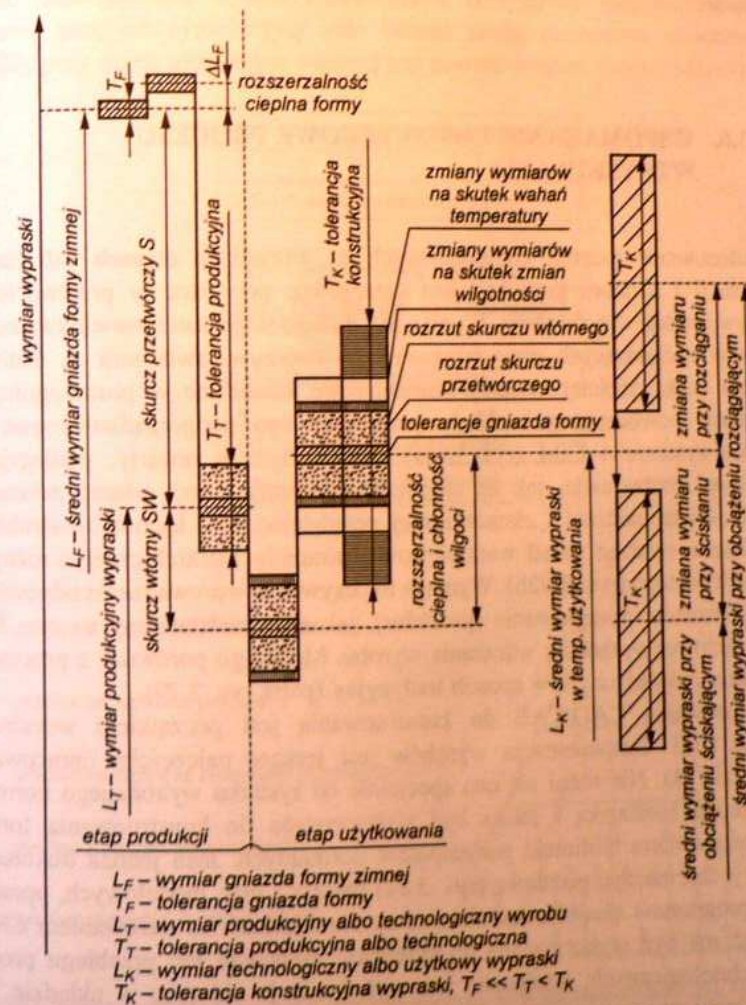
Tablica 3.9

Skurcz przetwórczy wyprasek z tworzyw termoplastycznych [%]

Tworzywo	Skurcz [%]	Tworzywo	Skurcz [%]
LDPE	1,5–3,0	PPE/PS	0,5–0,8
HDPE	1,5–3,0	PPE/PS 30% wł. szkl.	0,2
HDPE spieniony	1,5–3,0	PPE/PS spieniony	0,6–0,8
PP	1,3–2,5	CA	0,4–0,7
PP 20% wł. szkl.	1,2–2,0	CP	0,4–0,7
PP spieniony	1,5–2,5	CAB	0,4–0,7
EVA	0,8–2,0	PSU	0,6–0,8
PB	1,5–2,6	PSU 40% wł. szkl.	0,2–0,4
PVC twardy	0,4–0,8	PEK	0,7–0,9
PVC twardy spieniony	0,5–0,7	PEK 30% wł. szkl.	0,3–0,8
PVC miękki	0,7–3,0	PA amorf.	0,4–0,6
PVC miękki spieniony	0,7–3,0	EPDM	1,0–2,0
PS	0,4–0,7	PC	0,6–0,7
PS spieniony	0,4–0,6	PC spieniony	0,7–0,9
HIPS	0,4–0,7	PC 30% wł. szkl.	0,2–0,4
SAN	0,4–0,6	PET krystaliczny	1,6–2,0
SAN 30% wł. szkl.	0,2–0,3	PET amorficzny	0,2
ABS	0,4–0,7	PET 30% wł. szkl.	0,2–2,0
ABS 30% wł. szkl.	0,1–0,3	PBT	1,0–2,2
ABS spieniony	0,4–0,7	PBT spieniony	2,0–2,5
ASA	0,4–0,7	PBT 30% wł. szkl.	0,5–1,5
PMMA	0,3–0,8	PES	0,6
POM	1,5–2,5	PES 40% wł. szkl.	0,15
POM 30% wł. szkl.	0,5–1,0	PPS 40% wł. szkl.	0,2
PA 6	0,8–2,5		
PA 6 30% wł. szkl.	0,2–1,2		
PA 6.6	0,8–2,5		
PA 6.6 30% wł. szkl.	0,2–1,2		
PA 6.10	0,8–2,0		
PA 11	1,0–2,0		
PA 11 30% wł. szkl.	0,3–0,7		
PA 12	1,0–2,0		
PA 12 30% wł. szkl.	0,5–1,5		
PA 12 50% kulki szkl.	0,9		
PA 6-3-T	0,5–0,6		
PA 6-3-T 35% wł. szkl.	0,16–0,22		

3.3.5.2. Dokładność wymiarowa wyprasek

W przypadku wyrobów z tworzyw sztucznych niemożliwe jest uzyskanie dokładności wymiarowych osiąganych w elementach metalowych, a zbyt wąskie pole tolerancji jest równie nietechnologiczne, jak np. lokalne zgrubienia ścian. Przebieg zmian wymiarów wypraski w czasie produkcji oraz kształtowanie się pola tolerancji wyjaśniono na rys. 3.81. Wymiar L_F gniazda formy o tolerancji T_F zmienia się o wartość ΔL_F w wyniku podgrzania formy do temperatury pracy. Po wtrysnięciu tworzywo kurczy się o wartość skurczu przetwórczego S i wypraska mierzona dopiero po 16 godz. ma wymiar L_T , zwany wymiarem produkcyjnym lub technologicznym o tolerancji produkcyj-



Rys. 3.81. Zmiany wymiarów i powstawanie pola tolerancji wyprasek wtryskowych

nej albo technologicznej T_T . W późniejszym okresie następuje skurcz wtórny SW wypraski oraz ewentualne pęcznienie (w wyniku wchłaniania wilgoci) i zwiększenie wymiarów przy pracy wypraski w podwyższonej temperaturze. Ostateczny wymiar wypraski L_K nazywamy wymiarem konstrukcyjnym lub użytkowym. Tolerancja konstrukcyjna lub użytkowa T_K są wielkościami określwanymi przez konstruktora elementu.

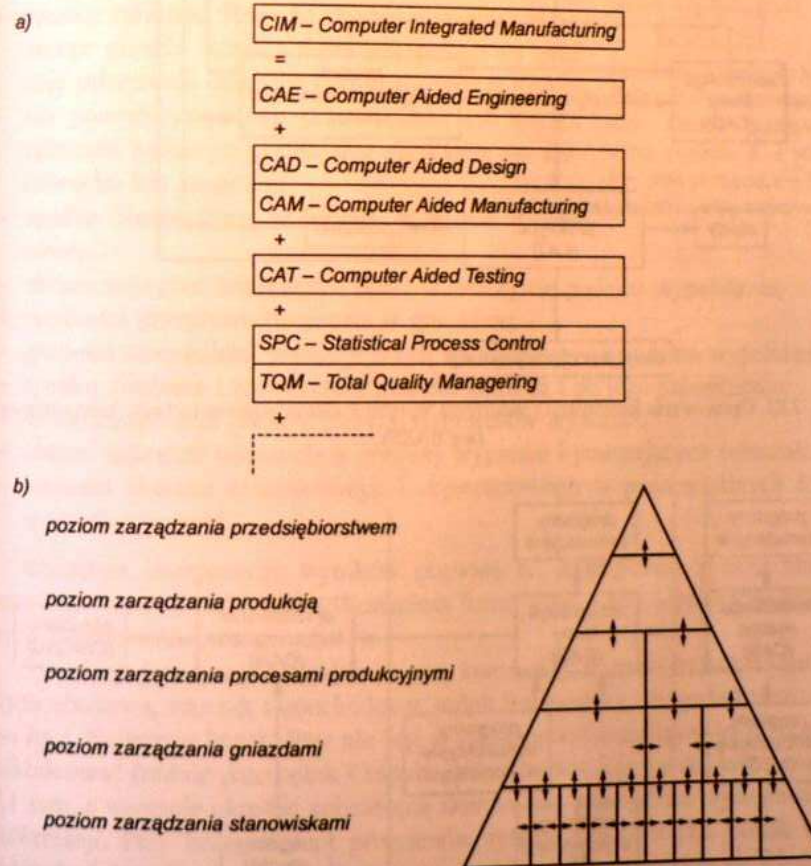
Przedmiotem norm dotyczących dokładności wymiarowej wyprasek z tworzyw sztucznych są wyłącznie tolerancje T_T wymiarów technologicznych L_T . Ponieważ zależność pola tolerancji od wymiaru nominalnego wyprasek jest funkcją liniową, dlatego *do wyprasek z tworzyw sztucznych nie można stosować układów tolerancji ISO dla metali opartych na parabolicznym układzie zależności.*

3.3.6. WSPOMAGANIE KOMPUTEROWE PROCESU WTRYSKIWANIA

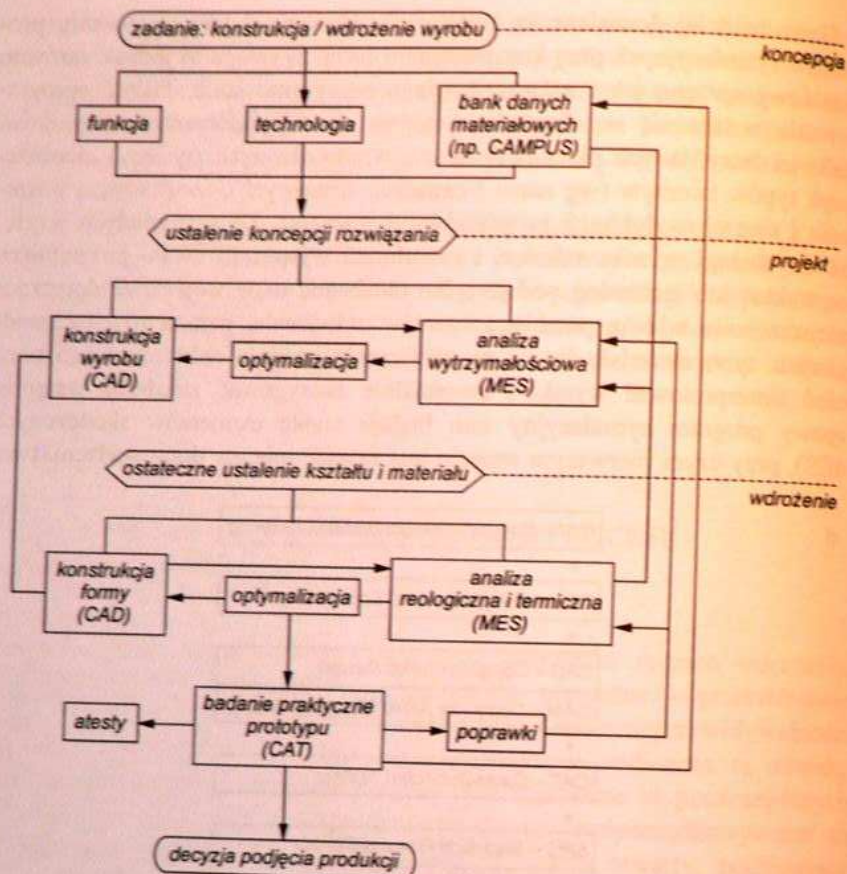
Zastosowanie technik komputerowych na wszystkich etapach wdrażania, organizacji i nadzoru produkcji jest szczególnie przydatne w przetwórstwie tworzyw metodą wtryskiwania. Wynika to z dużego stopnia nieprzewidywalności procesów zachodzących przy przetwórstwie tworzyw, zwłaszcza tą metodą. Ostatnio coraz częściej systemy komputerowe stosowane w poszczególnych oddziałach nowoczesnego zakładu przemysłowego podporządkowywane są jednemu systemowi CIM (rys. 3.82a). Jest to system otwarty, podlegający modułowej rozbudowie, tak że stopniowo obejmuje coraz więcej zakresów działalności technicznej i ekonomicznej przedsiębiorstwa łącznie ze strukturą zarządzania, tworząc układ wielopiętrowej piramidy hierarchicznej o różnych stopniach dostępu (rys. 3.82b). Wymaga to oczywiście wprowadzenia odpowiednich schematów postępowania (procedur), jak np. przedstawiony na rys. 3.83 zmodernizowany przebieg wdrażania wyrobu. Można go porównać z procesem wdrażania prowadzonym w sposób tradycyjny (patrz rys. 3.79).

Zastosowanie CAD/CAE do konstruowania jest początkiem wdrażania systemu CIM. Dokumentacja wyrobów jest jeszcze najczęściej opracowana w układzie 2D. Nie różni się ona specjalnie od rysunku wykonanego normalną techniką kreślarską i może być wykorzystana do konstruowania formy z wykorzystaniem biblioteki podzespołów normalnych. Jeśli jednak dokumentacja wyrobu ma być podstawą (rys. 3.84) dalszych prac modelowych, opracowania programów obróbki, np. elektrod na obrabiarkach ze sterowaniem CNC, bądź też ma być wykorzystana do symulacji zachowań lub przebiegu procesów technologicznych, konieczne jest wykonanie jej od razu w układzie 3D lub pracochłonne transponowanie z 2D na 3D.

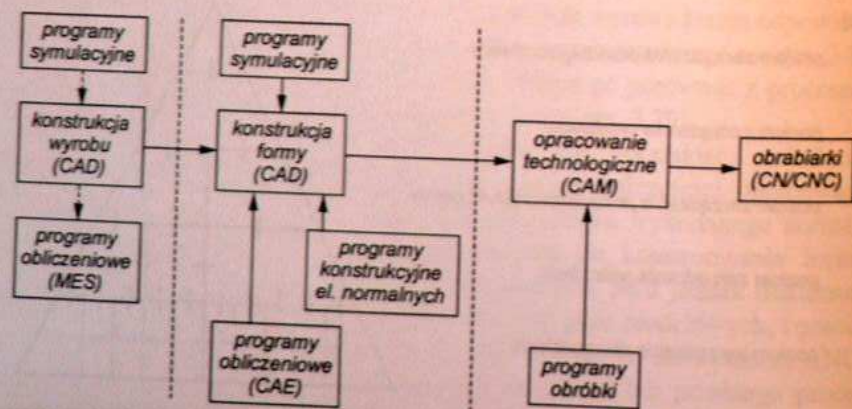
Coraz bardziej doceniane są korzyści uzyskiwane dzięki stosowaniu programów symulacyjnych przy konstruowaniu form. Wymaga to jednak zarówno rozbudowy sprzętu, jak i zakupu drogiego oprogramowania. Jakość oprogramowania ocenia się wg kryterium stopnia prawdopodobieństwa wyników, wielkości bazy danych określonej ilością wprowadzonych (tysięcy) charakterystyk typów tworzyw (wg nazw i oznaczeń firmowych), możliwością poszerzania i ciągłej modyfikacji programów (abonament). Ze zrozumiałych względów do obsługi są więc szkoleni i zatrudniani wyspecjalizowani programiści. Konstruktor lub technolog podaje tylko niezbędne dane wejściowe dotyczące umiejscowienia wlewu, przebiegu kanałów chłodzenia, parametrów technologicznych, typu materiału itp., a po skończeniu procesu obliczeniowego musi umieć zinterpretować wyniki i ewentualnie skorygować założenia wstępne. Typowy program symulacyjny sam buduje siatkę elementów skończonych (MES), przy czym pierwszym węzłem jest zawsze miejsce doprowadzenia two-



Rys. 3.82. Programy wspomaganie komputerowe pracy przedsiębiorstwa: a) system CIM, b) schemat hierarchicznego zarządzania przedsiębiorstwem



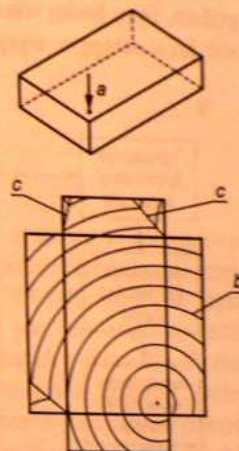
Rys. 3.83. Opracowanie konstrukcji i wdrożenia wyrobu z zastosowaniem techniki komputerowej (wg BASF)



Rys. 3.84. Konstrukcja wyrobu w CAD jako punkt wyjścia wykonania formy

tworzywa. Każdy z elementów skończonych stanowi moduł o ustalonym kształcie i grubości, np. płytka, walec, pierścień, i jest obliczany przez komputer na zasadzie zdefiniowanych typowych dla tego kształtu zależności matematycznych. Wynikiem obliczeń jest barwny wydruk:

- położenia czoł płynięcia w gnieździe formy w określonych chwilach (np. co 0,01 s); układ izochron pozwala na analizę równomierności wypełniania, określenie położenia linii łączenia (osłabienie wypraski) i ew. miejsc zamknięcia powietrza (rys. 3.85);
- położenia czoł płynięcia przy przepływie stałych pojemności; umożliwia to określenie miejsc, w których następuje przyspieszenie przepływu, i sposobu ustalania profilu szybkości wtryskiwania;
- spadku ciśnienia [bar] na drodze płynięcia; układ izobar określa miejsca tłumienia przepływu oraz daje informacje odnośnie miejsc spiętrzenia ciśnienia powodującego naprężenia własne lub spadku ciśnienia będącego potencjalną przyczyną np. niedolewów lub zapadnięć;
- spadku temperatury tworzywa w czasie wypełniania;
- obrazu naprężeń ścinających [kPa] w tworzywie podczas wypełniania;
- prędkości przepływu tworzywa w gnieździe;
- grubości zastygniętej warstwy przyściennej tworzywa podczas wypełniania;
- spadku ciśnienia i temperatury podczas docisku i po jego zakończeniu;
- czasu krzepnięcia poszczególnych fragmentów wypraski;
- obrazu naprężeń własnych w gotowej wyprawce i powstających odkształceń;
- wartości skurczu kierunkowego i objętościowego w poszczególnych fragmentach wypraski.

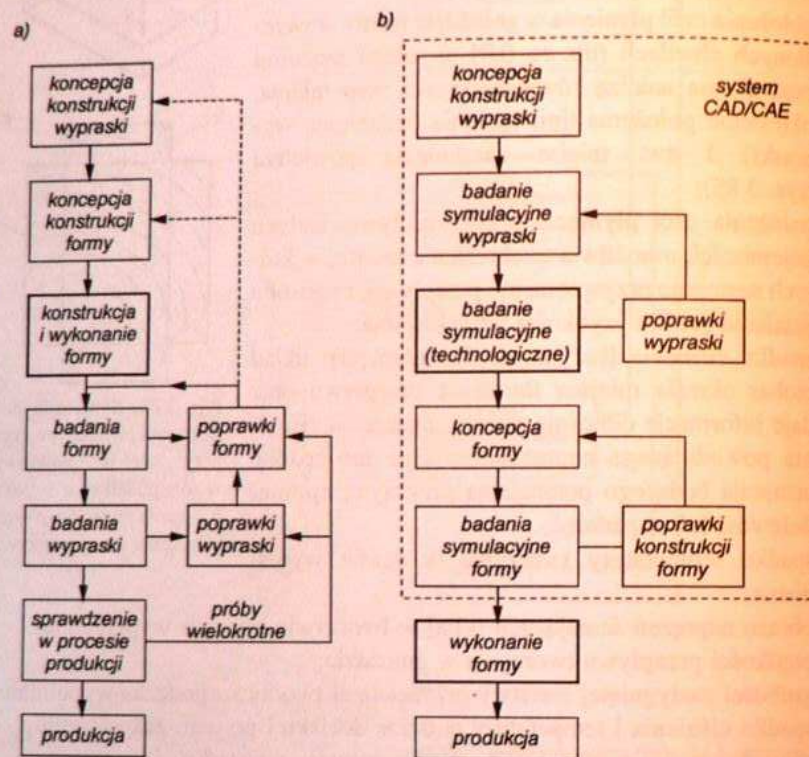


Rys. 3.85. Symulacja położenia czoł płynięcia tworzywa przy wlewie punktowym w róg pudełka: a – wlew, b – czoła płynięcia, c – linie łączenia strug tworzywa

Właściwa interpretacja wyników pozwala na zmniejszenie ryzyka błędu, ponieważ odbywa się przed wykonaniem formy (rys. 3.86), a po etapie wstępnych założeń konstrukcyjnych.

Symulacja jest specjalnie zalecana przy konstrukcji form do dużych wyprasek (typu obudowa, zderzak samochodowy, pulpit sterowniczy, skrzynki transportowe itp.). Najlepszy konstruktor nie jest w stanie przewidzieć sposobu płynięcia, zróżnicować średnic przewęzek i kanałów doprowadzających z dokładnością do 0,1 mm, a wreszcie określić anizotropię skurczu czy przewidzieć występowanie deformacji. Przy korzystaniu z programów symulacyjnych trzeba jednak wiedzieć, że dokonują one symulacji stanu wprowadzonego, a właściwe rozwiązanie można uzyskać tylko metodą kolejnych przybliżeń. Ponadto, nawet przy zastoso-

waniu komputerów profesjonalnych (stacji roboczych), o dużej szybkości pracy, czas obliczenia jednej konfiguracji geometrycznej może trwać kilkanaście godzin. Przy braku własnych możliwości w zakresie symulacji można je zamówić jako usługę w wyspecjalizowanych firmach.



Rys. 3.86. Przebieg konstruowania form: a) metoda konwencjonalna, b) metoda z wykorzystaniem komputera (CAD/CAM/CAE)

Coraz bardziej dostępne stają się też proste programy kalkulacyjne, programy do wstępnego określania parametrów wtryskiwania itp.; można je nawet uzyskać przez Internet. Katalogi elementów normalnych form, własności tworzyw i inne biblioteki przesyłane są na życzenie w postaci CD.

Bardziej złożone programy, jak np. doboru optymalnej geometrii ślimaka wtryskarki dla ściśle określonego tworzywa lub obliczenia warunków uplastyczniania są udostępniane przez producentów maszyn jako usługa związana z zakupem.

3.4. PRASOWANIE

Prasowanie stosuje się do wytwarzania wyrobów z tworzyw termoutwardzalnych. Są to materiały zestalające się w procesie przetwórstwa w tej samej podwyższonej temperaturze, w której zachodzi ich kształtowanie w stanie ciekłym^{*)}. Mechanizmem molekularnym utwardzania jest tzw. reakcja sieciowania przestrzennego, która polega na utworzeniu wiązań poprzecznych między makrocząsteczkami liniowymi, z których zbudowany jest materiał. Dzięki temu materiał uzyskuje odpowiednią sztywność i inne wymagane własności mechaniczne i fizykochemiczne. Reakcja sieciowania przestrzennego jest nieodwracalna, w związku z czym materiału utwardzonego w wyniku omawianego procesu nie można powtórnie przeprowadzić w stan ciekły lub inny stan odkształcalny umożliwiający przetwórstwo. Odpady i braki nie mogą być zatem zawracane do ponownego przetwórstwa.

3.4.1. PRASOWANIE TŁOCZNE

3.4.1.1. Definicja procesu

Prasowanie tłoczne polega na umieszczeniu chłodnego lub wstępnie ogrzanego tłoczywa w gnieździe otwartej formy, na zamknięciu formy, przeprowadzeniu tłoczywa poprzez ogrzanie w stan ciekły, wywołaniu pod naciskiem zamkniętej formy płynięcia tworzywa aż do całkowitego wypełnienia gniazda formy, zestaleniu tworzywa w podwyższonej temperaturze i na wyjęciu gotowej wypraski podczas otwierania formy.

3.4.1.2. Stosowane materiały

Materiał do prasowania, tzw. tłoczywo, składa się z żywicy organicznej, stanowiącej jego ośnowę i mogącej podlegać sieciowaniu w podwyższonej temperaturze, oraz z napelnacza, mającego najczęściej postać rozdrobnionych lub scalonych włókien, skrawków, proszków, taśm itp. W tabl. 3.10 podano

^{*)} Określenie „ciekły” nie jest ścisłe. Będzie ono jednak używane w sposób umowny, ponieważ alternatywne określenia stanu, w jakim znajduje się tworzywo podczas prasowania (np. stan plastyczny, płynny, lepkosprężysty), również nie są ścisłe poprawne w tym kontekście.

Tablica 3.10

Rodzaje tłoczyw termoutwardzalnych i parametry prasowania tłocznego tych materiałów

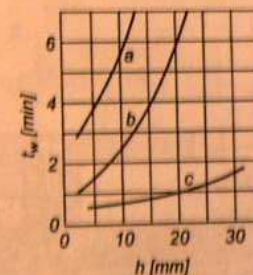
Rodzaj tłoczywa	Ciężar właściwy [10^4 N/m^3]	Współczynnik zgęszczenia		Skurcz [%]	Warunki prasowania		
		stan luźny	tabletki		ciśnienie [10^5 N/m^2]	temp. [$^{\circ}\text{C}$]	czas [s/mm]
Żywica fenolowa bez napelnacza	1,3	2,5	1,3	—	—	—	—
Żywica fenolowa z mączką mineralną	1,9	3,0	1,8	0,1–0,4	300–400	170–200	150
Żywica fenolowa z włóknem azbestowym	1,8	3,0	1,5	0,1–0,4	450–600	170–180	90
Żywica fenolowa ze sznurem azbestowym	1,95	13,0	4,0	0,1–0,3	300–600	150–170	45–75
Żywica fenolowa z mączką drzewną	1,35	2,5	1,4	0,4–0,8	250–300	150–160	30–60
Żywica fenolowa z krótkim włóknem celulozowym	1,4	5,5	2,0	0,2–0,6	200–400	160–170	25–30
Żywica fenolowa ze skrawkami celulozy	1,4	6,0	2,5	0,2–0,6	300–600	150–160	60–75
Żywica fenolowa z tkaniną celulozową	1,37	—	—	0,1–0,4	300–600	150–160	60–90
Żywica fenolowa z włóknem tekstylnym	1,38	5,5	2,0	0,2–0,6	300–800	160–170	60–90
Żywica fenolowa ze skrawkami tekstylnymi	1,38	10,0	3,5	0,2–0,6	400–550	150–160	60–90
Żywica fenolowa z tkaniną tekstylną	1,38	—	—	0,2–0,5	300–700	150–170	60–75
Żywica anilinowa	1,25	—	—	—	—	—	—
Żywica anilinowa z papierem	1,35	—	—	—	—	—	—
Żywica mocznikowa z krótkim włóknem celulozowym	1,35	4,0	—	0,2–0,8	150–400	135–150	45–60
Żywica mocznikowa z mączką drzewną	1,35	2,5	—	0,4–1,0	160–300	140–150	45–75
Żywica melaminowa z mączką drzewną	1,35	2,5	—	0,4–1,2	150–400	150–160	30–50
Żywica melaminowa z krótkim włóknem celulozowym	1,35	4,5	—	0,3–0,8	150–400	150–160	50–100
Żywica melaminowa z włóknem tekstylnym	1,45	8,5	—	0,2–0,6	300–600	150–160	45–60
Żywica melaminowa ze skrawkami tekstylnymi	1,45	7,0	—	0,2–0,6	300–600	150–160	45–60
Żywica melaminowa z mączką mineralną	2,0	3,0	—	0,2–0,4	200–600	150–160	30–45
Żywica melaminowa z włóknem azbestowym	1,65	2,5	—	0,3–1,0	200–600	140–160	30–45

najczęściej stosowane tłoczywa prasownicze oraz najważniejsze parametry ich przetwórstwa. Materiał uzyskany w wyniku procesu nazywa się tworzywem, w odróżnieniu od surowca noszącego nazwę tłoczywa.

Tłoczywa używa się w postaci rozdrobnionej lub tabletkowanej. Dzięki tabletkom osiąga się lepszą jakość wyprasek (mniejsza porowatość wyprasek na skutek tego, że tabletki wykazują mniejszą chłonność wilgoci), przyspiesza zadozowanie formy, unika ewentualnego wydmuchiwanie tłoczywa. Przy stosowaniu różnokolorowych tabletek istnieje możliwość uzyskania wyprasek o ściśle rozgraniczonym zabarwieniu.

3.4.1.3. Suszenie i podgrzewanie wstępne

Do prasowania stosuje się tłoczywo wysuszone. Do tego celu można używać suszarek z wymuszonym obiegiem powietrza; korzystniejsze jest jednak ogrzewanie prądami wysokiej częstotliwości w tzw. piecu pojemnościowym, gdyż w takim przypadku czas prasowania ulega skróceniu prawie o połowę (rys. 3.87). Tłoczywa, najczęściej tabletkowane, umieszcza się między metalowymi płytami, które działają jak okładki kondensatora, do których doprowa-



Rys. 3.87. Zależność czasu wygrzewania t_w (główny składnik cyklu prasowania – rys. 3.95) w temp. 160°C od grubości wypraski h dla tłoczywa fenolowego: a – bez ogrzewania wstępnego, b – 30-minutowe ogrzewanie wstępne w piecu w 105°C , c – ogrzewanie wstępne prądami wysokiej częstotliwości

dzony jest prąd z generatora wysokiej częstotliwości (ok. 27 MHz, przy napięciu ok. 2 V i mocy $0,5 \div 3 \text{ kW}$ w zależności od objętości ogrzewanego tłoczywa). Wnętrze tak ogrzewanych tabletek ma temperaturę wyższą niż warstwy zewnętrzne (np. powierzchnia zewnętrzna 65°C , wewnątrz 140°C). Dzięki ogrzewaniu wstępnemu osiąga się skrócenie czasu prasowania i polepszenie jakości wypraski (wyższa udarność, lepsze własności elektryczne, mniejsza liczba porów). Temperatura podgrzewania wstępnego wynosi dla tłoczyw fenolowych $90 \div 120^{\circ}\text{C}$, dla tłoczyw aminowych $75 \div 80^{\circ}\text{C}$.

3.4.1.4. Opis procesu technologicznego

Budowa formy

Prasowanie tłoczne jest zawsze procesem cyklicznym. Na rys. 3.88 przedstawiono schemat cyklu, na rys. 3.89 – szkic półkonstrukcyjny wielogniazdowej formy o zamknięciu teleskopowym do prasowania tłocznego. Gniazdem

The diagram illustrates the casting cycle as a circular process with the following stages and durations:

- napężnianie formy** (Form tightening)
- zamykanie formy** (Closing the mold)
- ściskanie tłoczywa** (Pressing the rammer)
- praszowanie** (Striking)
- zagęszczanie** (Compacting)
- utwardzanie** (Curing)
- czyszczenie formy** (Cleaning the mold)
- otwieranie formy** (Opening the mold)
- napężnianie formy** (Form tightening)

The durations for these stages are indicated by arcs on the circle:

- t_{czf} (duration of cleaning the mold)
- t_{otf} (duration of opening the mold)
- t_u (duration of curing)
- t_n (duration of form tightening)

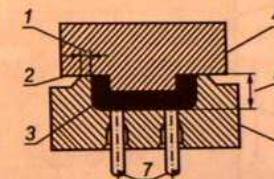
Additional labels include:

- koniec cyklu** (end of cycle)
- początek cyklu** (start of cycle)
- ruch stempli w tył** (movement of the rammer back)
- ruch stempli w przód** (movement of the rammer forward)

Ze względu na podstawowe rozwiązania konstrukcyjne, rozróżnia się formy o zamknięciu:

- 120

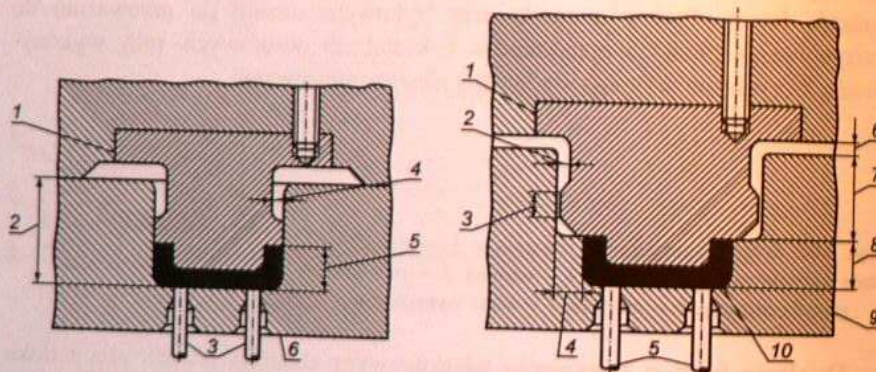
- W przypadku pokazanym na rys. 3.90 zamknięcie formy odbywa się przez zetknięcie płaskiego obrzeża stempla z płaskim obrzeżem matrycy. Nadmiar tłoczywa ma możliwość wypłynięcia na zewnątrz przez szczelinę zamykającego się obrzeża, tworząc poziomy rąbek prasowniczy. Głębokość gniazda matrycy jest równa wysokości wypraski. Przy takim zamknięciu formy należy stosować wyższe ciśnienie niż przy innych zamknięciach, gdyż w tym przypadku powierzchnia prasowania powiększa się o powierzchnię obrzeża, którego szerokość wynosi $4 \div 8$ mm. Usunięcie powstającego przy tym poziomego rąbka prasowniczego jest czasami bardzo kłopotliwe i czasochłonne. Zaletą form o zamknięciu stykowym jest ich niski koszt oraz małe zużywanie się, ze względu na ograniczenie do minimum części trących. W przypadku stosowania zapraszek rozwiązanie to jest bardzo dogodne, ze względu na płytkość gniazda formy. Formy o zamknięciu stykowym stosuje się przeważnie do otrzymywania płaskich przedmiotów o kształtach obrotowych, przy wykonywaniu których nie wymaga się bardzo silnego sprasowania.



Działanie form o zamknięciu teleskopowym zbliżone jest do pracy tłoka w cylindrze, przy czym tłokiem jest tu stempel a cylindrem matryca (rys. 3.91). Zamknięcie tego typu nadaje się szczególnie do prasowania głębokich przedmiotów wykonywanych z tłoczywa o dużej objętości pozornej oraz z napelnia-czem włóknistym. Nadmiar tłoczywa musi być w tym przypadku bardzo nie-wielki, gdyż nie ma ono możliwości wypłynięcia. Przy zbyt małej ilości tłoczywa przedmiot wychodzi niedoprasowany, przy zbyt dużej ilości — za gru-by. Luz między matrycą i stemplem waha się w granicach $0,07 \div 0,08$ mm i umożliwia jedynie odgazowanie materiału. Rąbek prasowniczy jest łatwy do usunięcia, ponieważ jest on przeważnie prostopadły do płaszczyzny a nie do powierzchni zakrzywionej, jak w wypadku form z zamknięciem stykowym.

121

jest możliwe dzięki kanałom między płaszczyznami stykowymi a podcięciem stempla. Liczba i wielkość kanałów powinna być dobrana w zależności od potrzeb. W formach o zamknięciu stykowo-teleskopowym można osiągnąć większy stopień sprasowania niż w formach o zamknięciu stykowym. Komora zasypowa pozwala na prasowanie tłoczyw o dużej objętości pozornej bez potrzeby tabletkowania. Dzięki samoczynnemu usuwaniu nadmiaru tłoczywa, otrzymuje się stale jednakową grubość wyprasek. W stosunku do form z zamknięciem stykowym ten typ zamknięcia daje mniejsze zużycie surowca. Wadą form z zamknięciem stykowo-teleskopowym jest ich wysoki koszt wykonania, trudności w umocowaniu zaprasek i niedokładność wyprasek, otrzymywanych z tłoczywa o napełniaczu grubocząstkowym, uniemożliwiający wpływ nadmiaru tłoczywa i powodujący pozostawanie w płaszczyźnie styku grubego i trudnego do usunięcia rąbka prasowniczego.

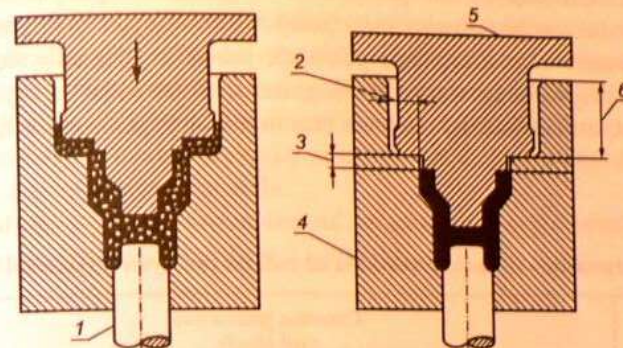


Rys. 3.91. Schemat zamknięcia teleskopowego: 1 - stempel, 2 - łączna głębokość matrycy i komory zasypowej, 3 - kolki wypychacza, 4 - luz, 5 - głębokość gniazda matrycy, 6 - matryca

Rys. 3.92. Schemat zamknięcia stykowo-teleskopowego: 1 - stempel, 2 - podcięcie stempla, 3 - wysokość prowadząca stempel, 4 - styk, 5 - kolki wypychacza, 6 - szczelina na wypływ nadmiaru tłoczywa, 7 - wysokość komory zasypowej, 8 - głębokość gniazda matrycy, 9 - matryca, 10 - wypraska

Forma o zamknięciu z przycięciem ma komorę zasypową umożliwiającą prasowanie tłoczyw o dużej objętości pozornej (rys. 3.93). Początkowo forma pracuje tak samo jak stykowo-teleskopowa, ale przed samym zamknięciem część stempla wchodzi w gniazdo matrycy, tak jak w formie teleskopowej, na głębokość 1,5÷2,5 mm. Nadmiar tłoczywa może wypłynąć przed zamknięciem się teleskopowych elementów formy, które zapewniają sprasowanie przedmiotu. Część teleskopowa zapewnia powstanie pionowego rąbka prasowniczego, a nawet jego przycięcie; stąd pochodzi nazwa tego rodzaju zamknięcia. Daje ono bardzo dobre rezultaty i powinno się je stosować przy wysokich wypraskach oraz przy przedmiotach o zmiennej grubości ścianek. Przy prasowa-

waniu tłoczyw mocznikowych i melaminowych, w przypadku niemożności stosowania form teleskopowych, należy używać form z opisany zamknięciem.



Rys. 3.93. Schemat zamknięcia z przycięciem: 1 - wypychacz, 2 - styk, 3 - zamknięcie teleskopowe, 4 - matryca, 5 - stempel, 6 - wysokość komory zasypowej

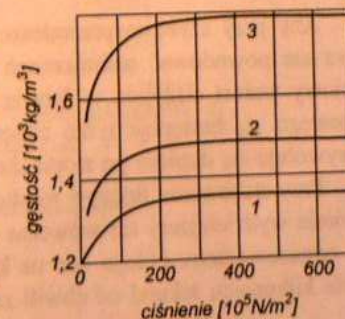
Parametry procesu

Podstawowymi parametrami wpływającymi zarówno na przebieg procesu prasowania, jak i na jakość uzyskanych wyprasek są: ciśnienie, temperatura i czas prasowania. Parametry te zostaną kolejno omówione.

Ciśnienie prasowania

Minimalna wartość ciśnienia wytworzonego podczas prasowania powinna być taka, aby pod jego wpływem zostały pokonane opory przepływu i wskutek tego tworzywo w stanie płynnym wypełniło dokładnie całą przestrzeń gniazda oraz aby zostało w gnieździe ściśnięte i wskutek tego osiągnęło odpowiednią gęstość. Charakter zmian gęstości prasowanego tworzywa od ciśnienia pokazano na rys. 3.94.

Opory przepływu zależą przede wszystkim od lepkości płynącego tworzywa oraz kształtu gniazda. Lepkość tworzyw termoutwardzalnych zależy od masy cząsteczkowej żywicy (im wyższa masa cząsteczkowa, tym większa lepkość), ilości i kształtu napełniacza (lepkość rośnie z ilością i następującą kolejnością postaci użytego napełniacza: drobnociągnisty, grubociągnisty, włóknisty, skrawkowy), temperatury i czasu ogrzewania. W miarę wzrastania ciśnienia opory są łatwiej pokonywane, tym większa powin-



Rys. 3.94. Wpływ ciśnienia na gęstość prasowanych tworzyw fenolowych: 1 - z mączką drzewną, 2 - z mączką mineralną, 3 - z włóknem szklanym

na być wartość stosowanego ciśnienia. Na rys. 3.94 widać, że wzrost gęstości zachodzi do ciśnienia 20 MPa, dalej zachowując wartość stałą. Ze wzrostem gęstości zachodzi jednocześnie polepszenie wskaźników wytrzymałościowych i dlatego konieczne jest stosowanie ciśnień wywołujących maksymalną gęstość sprasowania. Wzrost ciśnienia powoduje jednak zwiększenie się lepkości i zdolności przywierania wypraski do gniazda, w związku z czym należy stosować optymalne wartości ciśnienia prasowania, uwzględniające tę sprzeczność (tabl. 3.11).

Tablica 3.11

Zależność optymalnego ciśnienia prasowania od rodzaju tworzywa i wysokości wypraski

Wysokość wypraski [mm]	Ciśnienie prasowania [10 ⁵ N/m ²]		
	tworzywa o średniej płynności	tworzywa z napelniaczem włóknistym	tworzywa z napelniaczem skrawkowym
20	150	200	230
40	180	240	270
60	210	280	310
80	245	320	360
100	280	360	410
130	330	420	500
160	380	490	590
190	430	560	680
220	500	630	780

Aby przy szybkim przemieszczaniu się niedostatecznie stopionego tłoczwa nie powodować nadmiernego zużycia się gniazda, wywołuje się stopniowy wzrost ciśnienia w formie (rys. 3.95). Pod wpływem ciśnienia początkowego p_0 następuje tylko zagęszczenie tłoczwa; ciśnienie prasowania p_p wywołuje się dopiero po stopieniu tłoczwa.

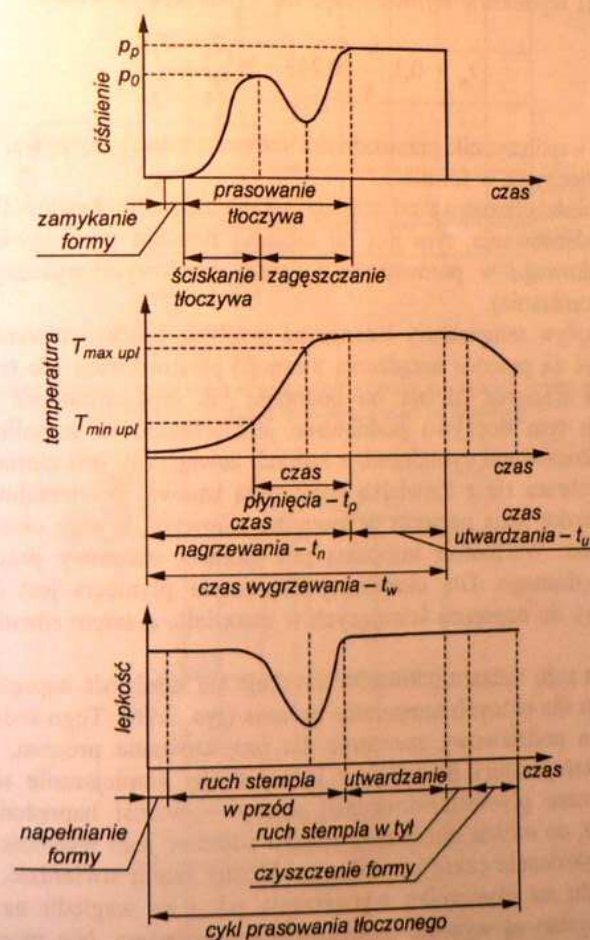
Przy stosowaniu tłoczyw nieskondensowanych, celem ułatwienia odparowywania wydzielającej się wówczas dużej ilości wody, prowadzi się prasowanie z odgazowaniem. Polega ono na krótkotrwałym podniesieniu stempla po upływie kilkunastu sekund od chwili zamknięcia formy.

Temperatura prasowania

Następnym istotnym czynnikiem wpływającym na przebieg prasowania jest temperatura procesu. Jest ona zależna od rodzaju żywicy i stopnia jej skondensowania. Do osiągnięcia temperatury wstępnego uplastycznienia T_{minpl} (zazwyczaj nieco powyżej 100°C) tłoczywo nagrzewa się powoli. Jego lepkość jest wówczas dość duża. W temperaturze całkowitego upłynnienia T_{maxpl} lepkość osiąga wartość minimalną. Temperatura ta wynosi przykładowo: 170°C dla tłoczyw fenolowych, 160°C dla melaminowych, 150°C dla mocznikowych.

Przy przejściu tłoczwa w stan ciekły rozpoczyna się w nim proces utwardzania, którego szybkość wzrasta w przybliżeniu dwukrotnie przy każdym podwyższeniu temperatury o 10°C. Ze względu na wydajność procesu powinno się stosować temperaturę formy T_f możliwie jak najwyższą, przy której jednak tworzywo ma jeszcze na tyle niską średnią lepkość, że wypełnia całkowicie formę. Czas, w którym materiał ma ekstremalnie niską lepkość, jest wówczas bardzo krótki (wykres lepkość-czas na rys. 3.95). W cienkich wyrobach prasowanych w zbyt wysokiej temperaturze występują obszary o niedostatecznie zagęszczonym materiale.

Ważna jest również równomierność temperatury na powierzchni gniazda formy, co decyduje o jednorodności wypraski.



Rys. 3.95. Przebieg ciśnienia, temperatury i lepkości tworzywa podczas prasowania tłoczego

Czas prasowania

Powyżej omówiono oddzielnie dwa podstawowe parametry procesu: ciśnienie i temperaturę. Należy zdawać sobie jednak sprawę z tego, że wszystkie parametry procesu wpływają na siebie wzajemnie (tzw. zjawisko sprzężeń), przy czym szczególnie silne jest powiązanie temperatury z czasem prasowania.

Najistotniejszą częścią czasu cyklu prasowania tłoczego jest czas wygrzewania t_w , który jest sumą czasu nagrzewania t_n i czasu utwardzania t_u (rys. 3.95). Czas wygrzewania powinien być na tyle długi, aby w wyprasce nastąpiło utwardzenie żadanego stopnia. Częścią czasu nagrzewania jest z kolei czas płynięcia t_p , liczony od momentu zapoczątkowania do zakończenia istnienia stanu płynnego. Czas nagrzewania t_n zależy od temperatur: formy T_f oraz początkowej tłoczywa T_0 , końcowej tłoczywa T_k , własności cieplnych tłoczywa oraz wymiarów wyrobu i daje się wyznaczyć ze wzoru

$$t_n = 0,1 \frac{h^2}{\alpha} \left(0,243 - \ln \frac{T_k - T_f}{T_0 - T_f} \right) \quad (3.16)$$

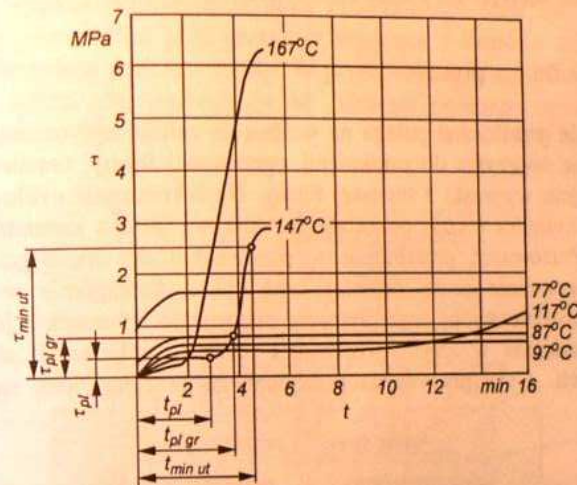
gdzie: α – współczynnik przewodności temperaturowej tłoczywa, h – średnia grubość tłoczywa w formie.

Czas utwardzania zależy od stopnia skondensowania żywicy (im wyższy stopień skondensowania, tym jest on krótszy) oraz od typu żywicy (żywice typu nowolakowego w porównaniu z typem rezolowym wykazują większą szybkość utwardzania).

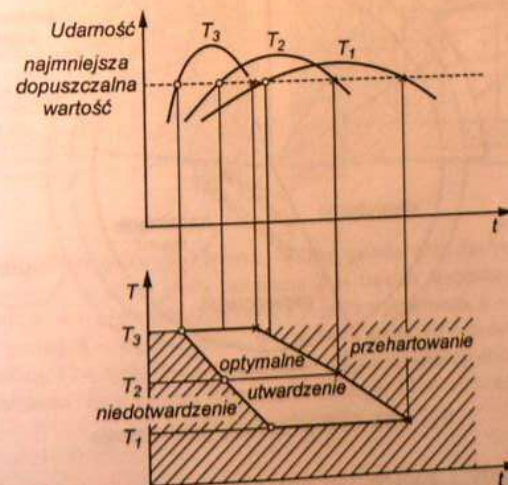
Łączny wpływ temperatury i czasu na przebieg procesu utwardzania daje się wyznaczyć za pomocą urządzenia zwanego plastometrem lub też często – plastometrem Kanavca (działa on podobnie jak lepkościomierz rotacyjny). W urządzeniu tym tłoczywo poddawane jest ścinaniu w szczelinie między dwoma współosiowymi cylindrami, z których zewnętrzny jest nieruchomy, zaś wewnętrzny obraca się z niewielką prędkością kątową. Powierzchnie pracujące obu cylindrów mają nacięcia w kierunku osiowym, a więc prostopadłe do kierunku ruchu. Wielkością mierzoną jest moment obrotowy przyłożony do cylindra napędzanego. Dla określonej kinematyki płynięcia jest on liniowo proporcjonalny do naprężeń ścinających w materiale, a zatem również do jego lepkości.

W wyniku tego rodzaju pomiarów uzyskuje się zależność naprężeń ścinających od czasu dla różnych temperatur badania (rys. 3.96). Tego rodzaju charakterystyka ma podstawowe znaczenie dla projektowania procesu. Widać, że zwiększanie temperatury powoduje z jednej strony zmniejszanie się lepkości i skracanie czasu płynięcia, z drugiej strony – wzrost naprężeń materiału utwardzonego, co można interpretować jako poprawę jego własności mechanicznych oraz skrócenie czasu utwardzania. Można zatem stwierdzić, że zarówno ze względu na ekonomikę wytwarzania jak i ze względu na własności wyrobu, korzystne są wysokie temperatury przetwórstwa. Nie mogą one być jednak zbyt wysokie, ponieważ łatwo jest wówczas doprowadzić do destrukcji termicznej, która często nazywana jest w tym procesie przehartowaniem. Na

rys. 3.97 pokazano wpływ czasu i temperatury utwardzania na własności mechaniczne gotowego wyrobu, których miarą jest w danym wypadku udarność. Widać, że wyższa temperatura powoduje wprawdzie polepszenie własności wyrobu, ale pod warunkiem stosowania dość ostrych reżimów czasowych, których przekroczenie powoduje znacznie większe pogorszenie własności niż w przypadku niższych temperatur. W związku z tym daje się ustalić pole optymalnych temperatur i czasów utwardzania, poza którym leży obszar nieodtworzenia i przehartowania.



Rys. 3.96. Łączny wpływ czasu utwardzania i temperatury na lepkość wyrażoną naprężeniem stycznym τ (żywica fenolowa z mączką drzewną)



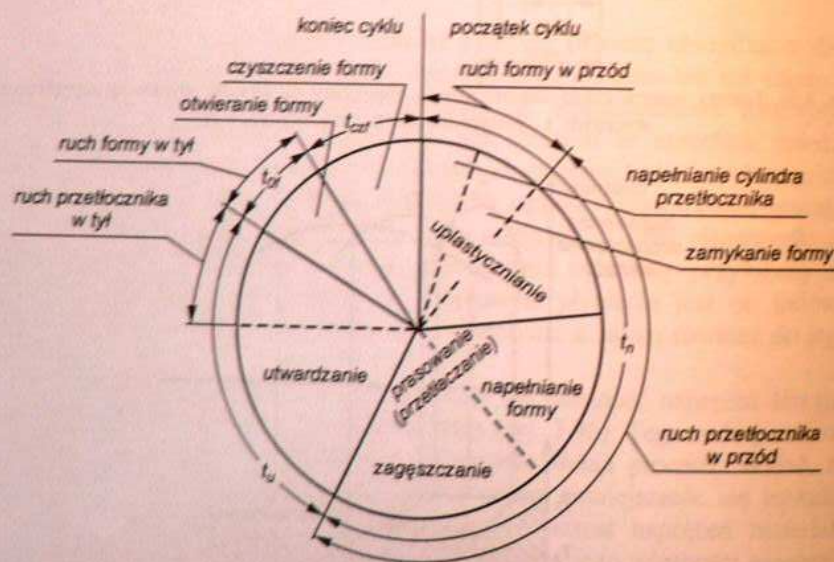
Rys. 3.97. Łączny wpływ czasu utwardzania i temperatury na udarność i wynikający stąd sposób określania optymalnych warunków utwardzania

Czas wygrzewania t_w zależy od grubości wypraski. W praktyce stosuje się regułę przyjmującą $20 \div 30$ s na 1 mm grubości wypraski. W pewnym stopniu na wartość tego czasu wpływa również postać napełniacza oraz kształt wypraski. Jest ona tym większa, im drobniejszy jest napełniacz oraz im mniejszy jest stosunek objętości wypraski do jej powierzchni.

3.4.2. PRASOWANIE PRZETŁOCZNE

3.4.2.1. Definicja procesu

Prasowanie przetłoczne polega na wciśnięciu całości upłynnionego w gorącym cylindrze tworzywa do zamkniętej, ogrzewanej formy, zestaleniu tworzywa i na wyjęciu wypraski z otwartej formy. Na zakończenie cyklu prasowania usuwa się z cylindra resztki pozostałego tworzywa wraz z kanałami doprowadzającymi. Prasowanie przetłoczne w porównaniu do tłocznego umożliwia lepsze wykorzystanie prasy (krótszy czas cyklu, szczególnie w przypadku wyprasek grubościennych) oraz zapewnia otrzymanie wyprasek o jednakowym stopniu utwardzenia w całym przekroju i przez to o lepszych własnościach mechanicznych. Cykl prasowania przetłocznego przedstawiono na rys. 3.98.



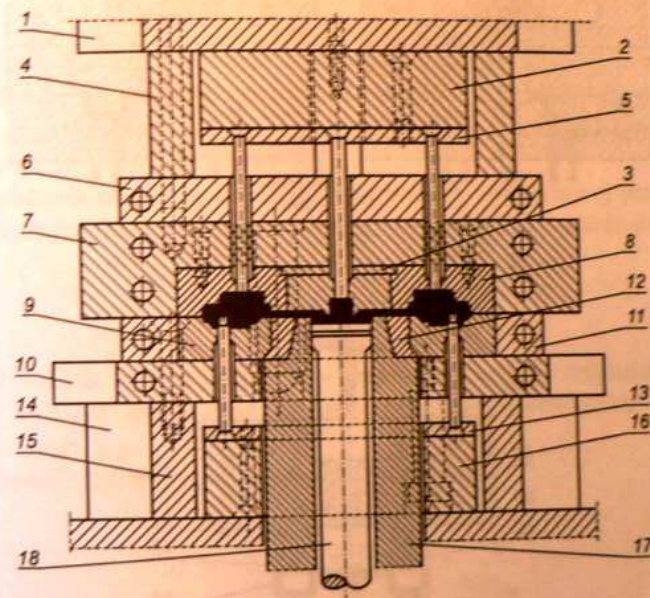
Rys. 3.98. Cykl prasowania przetłocznego

Stosowane materiały i sposób ich wstępnego przygotowania są podobne jak w przypadku prasowania tłocznego (p. 3.4.1.2 i 3.4.1.3).

3.4.2.2. Opis procesu technologicznego

Budowa form i zależności wymiarowe

Najczęściej prasowanie przetłoczne prowadzi się przy użyciu prasy podwójnego działania, pionowej, stosując formę z tłokiem przetłocznym napędzanym od dołu (rys. 3.99). Możliwe jest również stosowanie prasy pojedynczego działania, ale wymaga to specyficznej konstrukcji formy (rys. 3.100). W takim przypadku powierzchnia tłoka przetłocznego musi być większa od sumarycznej powierzchni pola przekroju wyprasek i kanałów doprowadzających w płaszczyźnie podziału formy. W przeciwnym przypadku nastąpi uchylenie formy przez siłę pochodzącą od ciśnienia płynnego tworzywa w jej gniazdach.



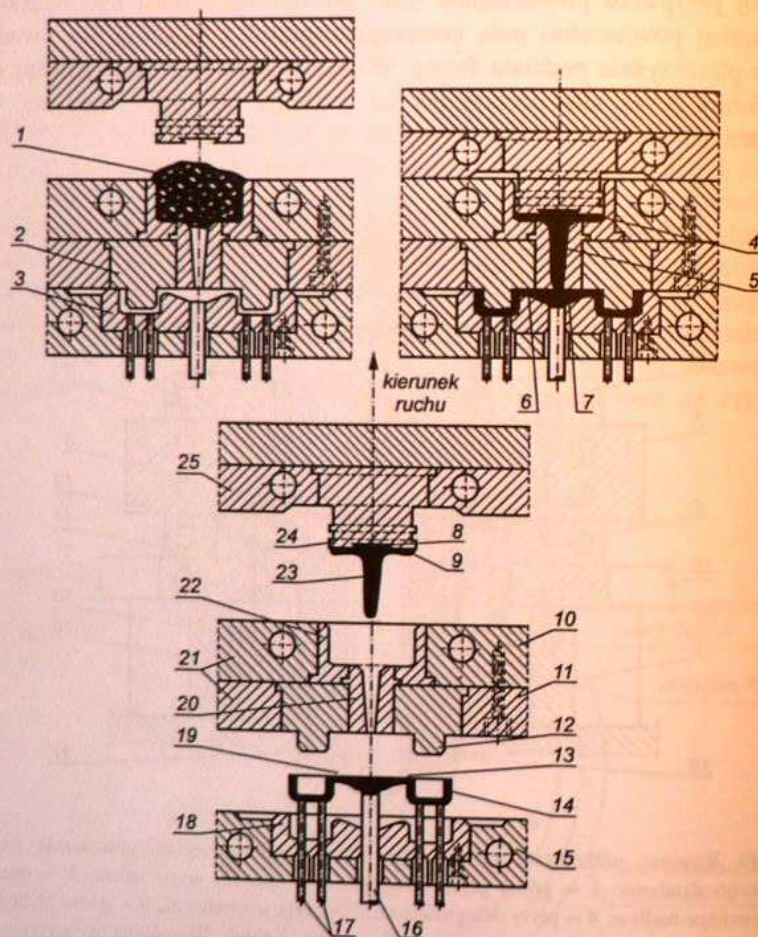
Rys. 3.99. Rysunek półkonstrukcyjny typowej formy przetłoczej do prasowania na prasie podwójnego działania: 1 - górna płyta mocująca, 2 - trawers wypychacza, 3 - urządzenie przytrzymujące nadlew, 4 - płyty odległościowe, 5 - płyta wypychacza, 6 - górna płyta grzejna, 7 - płyta matrycy górnej, 8 - matryca górna, 9 - matryca dolna, 10 - dolna płyta grzejna, 11 - obie matryce dolnej, 12 - tuleja pomocnicza, 13 - płyta wypychaczy dolnych, 14 - obudowa, 15 - płyta odległościowa, 16 - trawers wypychacza dolnego, 17 - tuleja komory przetłoczonej, 18 - przetłocznik

W przypadku typowej formy przetłoczej (rys. 3.99) można wykonywać wypraski o dopuszczalnej powierzchni formowania F_w (suma pól przekrojów

wyrasek wraz z układem wlewowym w płaszczyźnie podziału formy) wyrażonej zależnością

$$F_w = \frac{P_{zam} - P_p}{P_{zew}} \quad (3.17)$$

gdzie: P_{zam} – siła zamykania formy wywierana przez prasę, P_p – nacisk przetłaczania wywierany przez dodatkowy siłownik prasy, P_{zew} – ciśnienie wewnętrzne, tj. panujące w gnieździe formy.



Rys. 3.100. Schemat prasowania przetłocznego przy zastosowaniu prasy pojedynczego działania: 1 – tłoczywo w komorze zasypowej, 2 – górna matryca, 3 – dolna matryca, 4 – wypływ tłoczywa, 5 – kanał przelotowy, 6 – nadlew dolotowy, 7 – wlot, 8 – zabierak wyciągający, 9 – nadlew wypływu, 10 – płyta komory zasypowej, 11 – płyta pomocnicza, 12 – górna matryca, 13 – nadlew przelotowy, 14 – wypraska, 15 – płyta matrycy dolnej, 16 – wypychacz nadlewu, 17 – wypychacz wyrasek, 18 – gniazdo matrycy, 19 – nadlew wlotowy, 20 – tuleja kanału przelotowego, 21 – ruchome płyty górnej matrycy, 22 – tuleja komory zasypowej, 23 – nadlew przelotowy, 24 – przetłocznik, 25 – płyty przetłocznika

Wartości wywołanych ciśnień wewnętrznych przy prasowaniu przetłocznym są na ogół zbliżone do ciśnień stosowanych przy prasowaniu tłocznym i w podobny sposób uzależnione od rodzaju tłoczywa.

Przyjmując, że podczas przepływu tworzywa z cylindra przetłocznego do gniazda formy, wskutek występujących oporów przepływu, zachodzi spadek ciśnienia wynoszący zwykle 2/3 ciśnienia prasowania, należy wywołać w cylindrze przetłocznym ciśnienie P_{zew} nazywane ciśnieniem zewnętrznym lub ciśnieniem prasowania przetłocznego o wartości

$$P_{zew} = \frac{2}{3} P_{zew} + P_{zew} \quad (3.18)$$

skąd

$$P_{zew} = 3 P_{zew} \quad (3.19)$$

Oznacza to, że ciśnienie prasowania przetłocznego jest przeciętnie trzykrotnie wyższe od ciśnienia prasowania tłocznego i wynosi 120÷160 MPa dla tłoczyw o dużej i średniej płynności oraz 80÷120 MPa dla tych samych tłoczyw wstępnie podgrzanych (patrz p. 3.4.1.3). Dla tłoczyw z włóknistym wypełnieniem stosuje się ciśnienie ok. 200 MPa.

Na podstawie wartości nacisku przetłaczania P_p dla wybranej prasy można określić średnicę tłoka przetłaczającego (przetłocznika) D z zależności

$$P_p = \frac{\pi D^2}{4} P_{zew} + \pi D H \mu P_{zew} \quad (3.20)$$

gdzie: H – skok przetłocznika, μ – współczynnik tarcia upłynnionego tworzywa o cylinder przetłoczny (dodatek około 1% dwusiarczku molibdenu znacznie obniża μ).

Ze wzoru (3.20) otrzymuje się bezpośrednio

$$D = -2 H \mu + 2 \sqrt{H^2 \mu^2 + \frac{P_p}{\pi P_{zew}}} \quad (3.21)$$

Dla stosowanych często cylindrów przetłocznych o wysokości roboczej H dwukrotnie większej od średnicy D , tzn. dla

$$H = 2 D \quad (3.22)$$

otrzyma się, podstawiając zależność (3.22) do wzoru (3.21) pole powierzchni przetłocznika F_{prz} :

$$F_{prz} = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{P_p}{P_{zew} (1 + 8 \mu)} \quad (3.23)$$

Uwzględniając zależność (3.19) oraz biorąc pod uwagę fakt, że siła zamykania formy P_{zam} jest zazwyczaj trzykrotnie większa od siły przetłaczania P_p , którą daje siłownik napędzający przetłocznik, tzn. że

$$P_{zam} = 3P_p \quad (3.24)$$

otrzymuje się po podstawieniu do równania (3.23)

$$F_{prz} = \frac{P_{zam}}{9p_{wew}(1+8\mu)} = \frac{F_w}{9(1+8\mu)} \quad (3.25)$$

gdzie F_w – powierzchnia formowania (patrz również wzór (3.17)).

Z równania (3.25) wynika, że dla omówionego, dość typowego przypadku, pole przetłocznika stanowi około 10% pola powierzchni formowania.

W przypadku najczęściej stosowanych tabletek o średnicy d_t , dla użytecznego skoku tłoka przetłaczającego H , objętość przetłaczanego tworzywa V_d wyrazi się wzorem

$$V_d = 1,1 \frac{\pi d_t^2}{4} H \quad (3.26)$$

gdzie współczynnik 1,1 wyraża założenie, że objętość tłoczywa zalegającego w kanałach układu wlewowego i cylindrze przetłocznym wynosi ok. 10% objętości przetłaczanego tłoczywa. Zatem masa przetłaczanego tłoczywa m_d wynosi

$$m_d = V_d \rho_d \quad (3.27)$$

Dla najczęściej stosowanego tłoczywa fenolowego z mączką drzewną, którego gęstość po wyprasowaniu $\rho_w = 1,35 \text{ g/cm}^3$, gęstość przetłaczanego tłoczywa, przy uwzględnieniu części lotnych w stopionym materiale wynosi $0,8 \div 0,9$ gęstości po wyprasowaniu.

Po stopieniu nagrzewających się tabletek i ścisłym wypełnieniu cylindra przetłocznego tworzywem, tłok przetłocznika podczas napełniania gniazd formujących wykona skok

$$H = \frac{4V_d}{\pi D^2} \quad (3.28)$$

Ze wzrostem skoku, a tym samym wysokości cylindra przetłocznego, przy stałej sile prasowania wzrasta wydajność procesu a maleje stosunek powierzchni do objętości stopionego tworzywa, będący miarą sprawności topienia cylindra. Zatem w celu uzyskania dostatecznie krótkiego czasu topienia tłoczywa, przy prasowaniu bez podgrzewania wstępnego należy stosować małą wysokość załadowania. Wtedy zwykle $H = 1/2D$. Wykorzystanie prasy

jest jednak wówczas mniejsze w porównaniu z prasowaniem tłocznym. Dopiero przy użyciu tabletek wstępnie ogrzanych stosunki wymiarowe cylindra nie odgrywają ważniejszej roli. Przy małej szybkości prasowania (prędkość przetłocznika ok. 7 mm/s) można zastosować $H = 2D$, a przy dużej szybkości (prędkość przetłocznika 10 mm/s) – $H = 2,5D$. W takim przypadku wykorzystanie prasy może być takie samo, jak przy prasowaniu tłocznym.

Na podstawie wyznaczonej uprzednio masy tłoczywa przepływającego z cylindra przetłocznego do gniazda formującego można określić przekrój przewężki F_p oraz przekrój kanału F_k układu wlewowego. W tym celu korzysta się z zależności

$$F_p = k_1 m \quad (3.29)$$

gdzie k_1 – wskaźnik przekroju przewężki.

Na podstawie doświadczeń stwierdzono, że przy stosowaniu dla fenoplastów $k_1 = 0,31$, a dla aminoplastów $k_1 = 0,46 \text{ mm}^2/\text{g}$, uzyskuje się przewężkę, w której tworzywo rozgrzewa się wystarczająco, a jednocześnie nie zachodzi obawa o nadmierne niszczenie jego struktury pod wpływem naprężeń ścinających.

Aby wyznaczyć przekrój kanału wlewowego F_k , korzysta się z doświadczalnej zależności

$$F_k = k_2 F_p \quad (3.30)$$

gdzie k_2 – wskaźnik przekroju kanału o wartości $2,8 \div 3$.

Parametry procesu

Czas cyklu prasowania przetłocznego t_{cp} składa się z czasu nagrzewania t_n i utwardzania tłoczywa t_u oraz z czasu otwierania t_{of} i czyszczenia formy t_{cz} (rys. 3.98). Czas nagrzewania przy prasowaniu przetłocznym, obejmujący fazę topienia i przetłaczania, ulega znacznemu skróceniu w porównaniu z prasowaniem tłocznym. Jest to wynik intensywniejszego i równomierniejszego nagrzewania się tłoczywa przy jego przechodzeniu przez wąskie kanały układu wlewowego.

Czas nagrzewania t_n nie powinien przekroczyć wartości, przy której tworzywo występuje jeszcze w stanie płynnym. Przedłużanie tego czasu wywołuje niszczenie wiązań struktury powstającej przy utwardzaniu, co wpływa na zmniejszenie wytrzymałości prasowanego wyrobu.

Czas trwania stanu płynnego można wyznaczyć na podstawie wyników badań przedstawionych na rys. 3.96. Z rysunku wynika, że np. dla temperatury 120°C czas trwania stanu płynnego wynosi 11 min, dla temperatury 150°C – 2,9 min, dla temperatury 170°C – 1,2 min.

Czas nagrzewania t_n , ze względu na obejmowanie również fazy topienia, zależy od temperatury tłoczywa użytego do prasowania. Przy użyciu tłoczywa nie podgrzanego wstępnie dopuszczalny czas nagrzewania nie powinien prze-

kroczyć wartości zamieszczonych w tabl. 3.12. Przy użyciu tłoczywa podgrzanego wstępnie wartości te mogą być mniejsze.

Tablica 3.12

Dopuszczalny czas nagrzewania t_n przy prasowaniu przetłocznym tworzyw nie podgrzewanych wstępnie

Rodzaj tworzywa	Maksymalny czas nagrzewania
Żywice fenolowo-formaldehadowe:	
– typ rezolowy	do 70 s przy temp. prasowania 170°C
– typ nowolakowy	do 45 s przy temp. prasowania 160°C
Żywice melaminowe i mocznikowe	do 20 s przy temp. prasowania 150°C

W celu wyznaczenia czasu właściwej fazy przetłaczania t_p , będącego składnikiem czasu nagrzewania t_n należy skorzystać z przyjmowanej prędkości przepływu tworzywa przez przewężkę v , która powinna wynosić 0,2÷0,4 m/s. Można więc napisać

$$t_p = \frac{V_d}{F_p v} \quad (3.31)$$

Z wyznaczonym w ten sposób czasem przetłaczania wiąże się prędkość przesuwu tłoka przetłocznego v_p , wg zależności

$$v_p = \frac{H}{t_p} \quad (3.32)$$

Czas utwardzania t_u w przypadku prasowania przetłoczonego również ulega skróceniu o 30÷50%, w porównaniu z prasowaniem tłocznym.

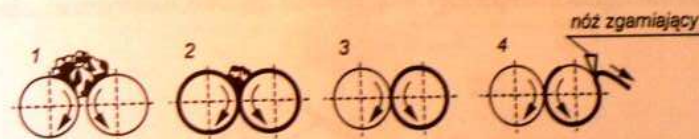
Całkowity czas cyklu prasowania przetłocznego jest krótszy od czasu cyklu prasowania tłocznego i nie zależy bezpośrednio od grubości wypraski.

Temperatura tworzywa powinna stopniowo wzrastać w kierunku gniazda formującego. Niska temperatura w cylindrze umożliwia większe załadowanie cylindra, bez obawy przedwczesnego utwardzenia tworzywa. Średnia temperatura w dyszy i kanałach doprowadzających ułatwia homogenizację cieplną tworzywa, a wysoka temperatura w gnieździe skraca proces utwardzania tworzywa. Przy prasowaniu tworzywa niedogrzanego wstępnie, najwyższą temperaturę wywołuje się w dyszy, gdzie tworzywo ulega właściwemu stopieniu. Temperatura gniazda przy prasowaniu przetłocznym jest nieznacznie niższa niż w przypadku prasowania tłocznego. Nieznaczny wzrost temperatury (2÷6%) na drodze przetłaczanego tworzywa następuje od ciepła wywiązującego się wskutek tarcia wewnętrznego podczas płynięcia.

3.5. WALCOWANIE I KALANDROWANIE

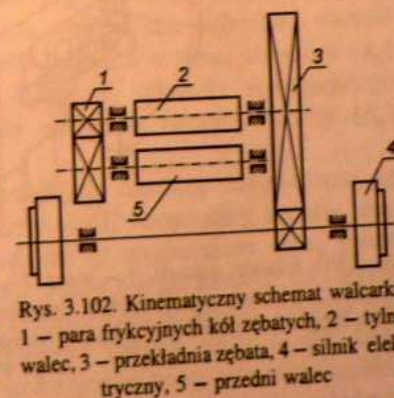
3.5.1. WALCOWANIE

Rozróżniamy walcowanie wstępne oraz formujące. *Walcowanie wstępne* jest procesem okresowym, polegającym na wielokrotnym wywołaniu płynięcia napelnacza i żywicy w szczelinie występującej między dwoma gorącymi obracającymi się przeciwbieżnie metalowymi walcami (rys. 3.101).



Rys. 3.101. Schemat walcowania: 1 – zasilenie szczeliny międzywalcowej tworzywem, 2 – walcowanie, 3 – koniec walcowania, 4 – ścinanie masy

Typowa walcarka składa się z dwóch wydrążonych walców ogrzewanych doprowadzaną przez osiowe otwory parą nasyconą o ciśnieniu odpowiadającym wymaganej temperaturze walcowania. Walce są osadzone czopami w łożyskach (na ogół ślizgowych) obliczonych na duże obciążenia. Łożyska spoczywają w maszynowym korpusie walcarki, przy czym jedna para ma położenie stałe, a druga może być przesuwana za pomocą śrub, co umożliwia regulację wielkości szczeliny między walcami (rys. 3.102). Walce mają napęd najczęściej indywidualny, zapewniający występowanie różnicy między prędkościami obwodowymi obu walców (rys. 3.103).



Rys. 3.102. Kinematyczny schemat walcarki: 1 – para frykcyjnych kół zębatach, 2 – tylny walec, 3 – przekładnia zębata, 4 – silnik elektryczny, 5 – przedni walec

Stosunek prędkości obwodowych walców tylnego (v_2) oraz przedniego (v_1) nosi nazwę frykcji (f):

$$f = \frac{v_2}{v_1}; \quad v_2 > v_1 \quad (3.33)$$

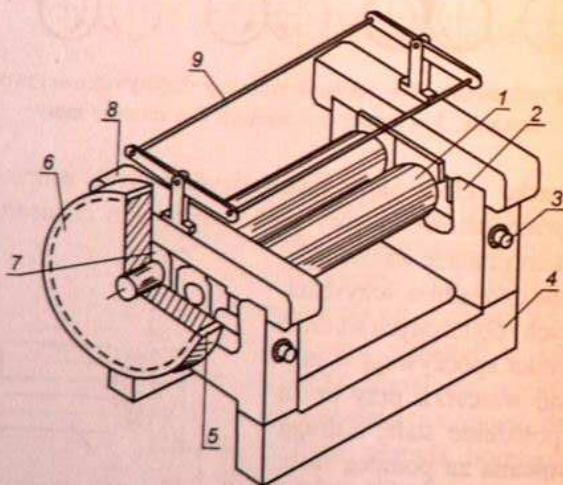
Wielkość regulowanej szczeliny międzywalcowej (h_0) w połączeniu z wielkością tarcia (f) ma wpływ na gradient prędkości tworzywa wyrażony równaniem

$$\text{grad } v = \frac{v_2 - v_1}{h_0} = \frac{v_1}{h_0} (f - 1) \quad (3.34)$$

gdzie: v_2 – prędkość obwodowa walca tylnego, v_1 – prędkość obwodowa walca przedniego, h_0 – wielkość szczeliny międzywalcowej, f – tarcie.

Klasyfikacja walcarek może być przeprowadzona wg następujących kryteriów:

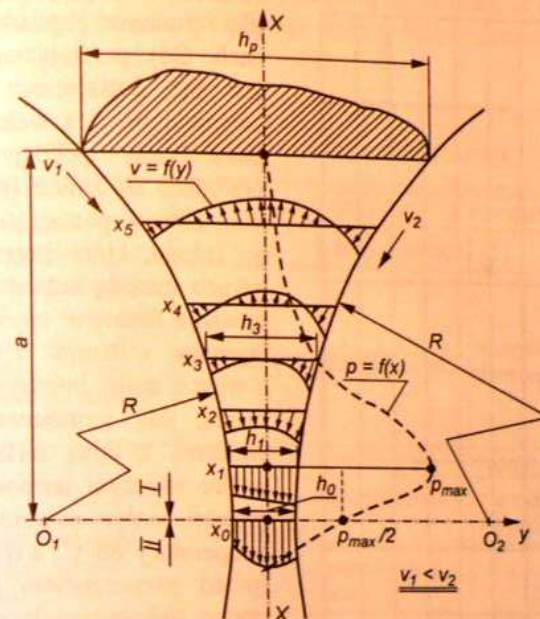
- wg średnicy i długości walców
typ lekki; $D = 300$ mm; $L = 800$ mm;
typ średni; $D = 500$ mm; $L = 1500$ mm;
typ ciężki; $D = 660$ mm; $L = 2100$ mm;
- wg wielkości tarcia; $f = 1,08; 1,17; 1,27; 1,39; 2,55; 4,00$;
- wg rodzaju powierzchni walca – gładkie, rowkowe;
- wg układu osi walców – poziomy, pionowy;
- wg liczby par walców – pojedyncza, zdwojona;
- wg sposobu regulacji temperatury – ogrzewanie (parowe, elektryczne), chłodzenie wodne.



Rys. 3.103. Schemat walcarki: 1 – walec, 2 – wspornik oprawy łożysk, 3 – pokrętło regulacji szczeliny międzywalcowej, 4 – płyta fundamentowa, 5 – korpus przedniego łożyska, 6 – koło zębate napędu tylnego walca, 7 – korpus tylnego łożyska, 8 – belka poprzeczna, 9 – pręt awaryjnego wyłącznika

Podczas wprowadzania tworzywa w szczelinę międzywalcową, jego warstewki stykające się z powierzchniami walców są zbierane siłami adhezji i prowadzone z prędkościami obwodowymi v_1 i v_2 ($v_2 > v_1$). Natomiast warstewki wewnętrzne tworzywa są poddawane złożonym ruchom z prędkościami

o wielkości i kierunku zależnymi od ich położenia w układzie $x-y$ (po czynnej stronie szczeliny I) (rys. 3.104).

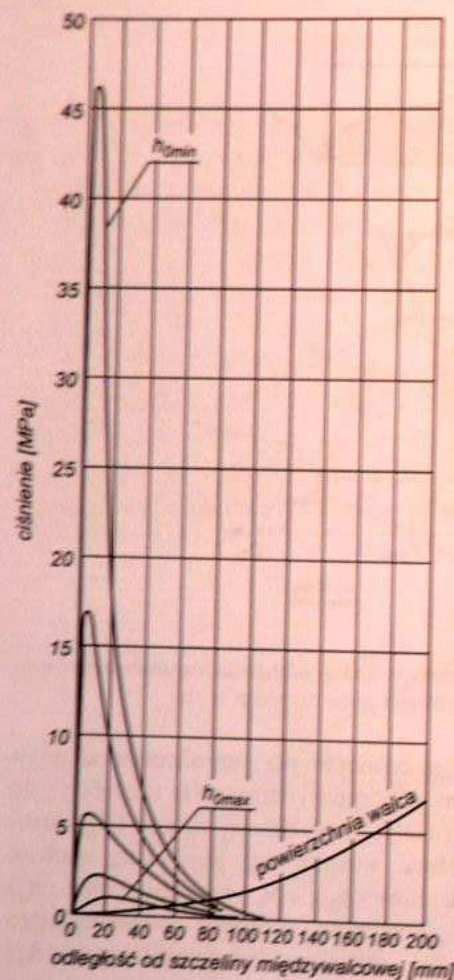


Rys. 3.104. Rozkład prędkości w warstwach tworzywa w funkcji odległości rozpatrywanego przekroju od osi (y) oraz przebieg ciśnienia w tworzywie $p = f(x)$

Podczas walcowania tworzywo podlega ciśnieniu $p(x)$ na odcinku od miejsca zapoczątkowania kontaktu z walcem po czynnej stronie (I) szczeliny, do miejsca utraty kontaktu z walcem przeciwnym po biernej stronie (II) szczeliny. Ciśnienie działające na powierzchnie walców ma najwyższą wartość zawsze przed minimalną szerokością szczeliny (h_0), a w samej szczelinie (h_0) osiąga połowę wartości największej. Zależność ciśnienia występującego w walcowanym tworzywie od wielkości szczeliny międzywalcowej (h_0) przedstawiono na rys. 3.105.

Proces walcowania wstępnego ma następujący przebieg: Po ustaleniu się właściwej dla danego składu mieszanki (tabl. 3.13) temperatury walców, uregulowaniu szczeliny między nimi, nakłada się na uruchomione walce porcje mieszanki w postaci proszku, ciasta, pasty. Walce kierują materiał do szczeliny, gdzie na skutek tarcia powstają duże naprężenia ścinające. Energia mechaniczna zużyta na mieszanie porcji materiału zmienia się w ciepło, które wraz z ciepłem przekazanym mieszance przez gorące walce powoduje szybkie ogrzanie się mieszanki. Masa zaczyna oklejać walce, formując na jednym z nich jednolitą warstwę (płat), zwany także skórą. Intensywność mieszania w szczelinie i jej najbliższej okolicy zależy od prędkości obwodowej walców, tarcia, odległości między walcami i lepkości materiału. Mieszanie w szczelinie walcarki wywołane jest przez działanie jednokierunkowych naprężeń ści-

nających, natomiast do uzyskania jednorodnego wymieszania materiału konieczna jest wielokrotna zmiana kierunku naprężeń. W tym celu trzeba stale nacinać formujący się na walcach płat i zmieniać jego ułożenie na walcach. Gdy przerabiana porcja masy jest już dostatecznie wymieszana, zdejmuję się ją z walców w postaci płata, który poddaje się dalszej przeróbce na zimno (np. granulowanie), albo w postaci ściśle zwiniętego rulonu, który przetwarza się na gorąco metodą kalandrowania. Walcowanie tworzyw termoplastycznych wymaga walcarek z małą frykcją, a więc o małej intensywności walcowania, zaś termoutwardzalnych – walcarek z dużą frykcją. W przypadku tworzyw termoutwardzalnych przedni walec nagrzewany jest do temperatury 85°C, a tylny do 115°C (przed rozpoczęciem pracy). Tworzywo uplastyczniające się podczas walcowania przywiera najpierw do walca gorętszego tylnego, a później, w miarę zachodzącej kondensacji, przechodzi na walec chłodniejszy przedni. W przypadku tworzyw termoplastycznych, ze względu na częste ich przywieranie do gorętszego walca, wyższą temperaturę wywołuje się na przednim walcu. Temperatura walcowania nie powinna być nigdy niższa od temperatury uplastycznienia danej żywicy. W temperaturach niższych lepkość walcowanego tworzywa wzrasta



Rys. 3.105. Zależność ciśnienia w walcowanym tworzywie od wielkości szczeliny międzywalcowej h_0

i makrocząsteczki żywicy podlegają znacznemu rozdrobnieniu, co wywołuje ich depolimeryzację.

Homogenizacja za pomocą walcarek jest procesem bardzo pracochłonnym i mało wydajnym, gdyż w procesie walcowania mieszanin podlega nie cała porcja materiału, a tylko jego część, znajdująca się aktualnie w szczelinie i jej najbliższej okolicy. Z tych względów homogenizację prowadzi się z zastosowaniem procesów i urządzeń bardziej nowoczesnych, często jednak walcarki stanowią konieczne uzupełnienie tych instalacji celem nadania homogenizowanemu materiałowi postaci taśmy, odpowiedniej do dalszych faz produkcji.

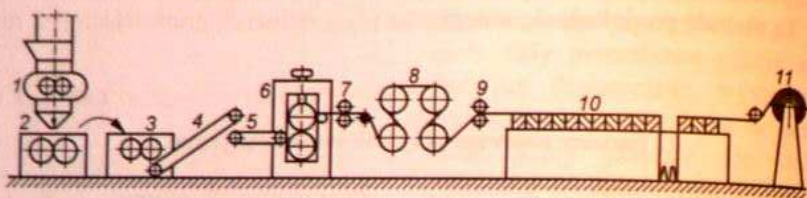
Walcowanie formujące polega na ciągłym zasilaniu walcarki wstępnie uplastycznionym plastifikatem, który po jednokrotnym przejściu przez jedną szczelinę międzywalcową jest odbierany na bębny chłodzące i zwijany na walec odbierającym. Tą metodą produkuje się wstęgi oraz płyty o dużych grubościach (~2 mm).

Tablica 3.13

Surowce stosowane przy walcowaniu wstępnym

Użyte surowce	Otrzymany wyrób wstępny		
	rodzaj	przeznaczenie	uwagi
Mieszanka żywicy fenolowo- lub krezolowo-formaldehidowej (najczęściej typ nowolakowy) z napelniaczem, substancją smarującą, przyspieszczem kondensacji i barwnikiem	zestawiony płat	rozdrabnianie	tloczywo do prasowania tloczego i przetloczego
Pasta żywicy polichlorowinyłowej ze zmiekczaczem i barwnikiem (napelniaczem)	zestawiony płat	rozdrabnianie	granulat do prasowania tloczego i przetloczego, wtryskiwania, wytłaczania
		prasowanie płytowe	–
	uplastyczniony walek	walcowanie, kalandrowanie	–
Upłastyczniona przez ugniatanie żywica kauczukowa z przyspieszczem, inicjatorem, antyutleniaczem, zmiekczaczem, napelniaczem, barwnikiem i siarką; mieszanka żywicy kauczukowej z ww. dodatkami, bez siarki	uplastyczniony płat	nakładanie, nawijanie, prasowanie niskociśnieniowe	–
	uplastyczniony walek	walcowanie, kalandrowanie	początkowo (wysoka temp.) uplastycznia się i miesza żywice z dodatkami, a później (niska temp.) z dodatkowo wprowadzoną siarką
Mieszanka żywicy polichlorowinyłowej lub polistyrenowej, polietylenowej, poliizobutylenowej albo octanu celulozy ze stabilizatorem i barwnikiem (napelniaczem)	uplastyczniony walek	wytłaczanie tłokowe, walcowanie, kalandrowanie	–
	zestawiony płat	rozdrabnianie	granulat do prasowania tloczego i przetloczego, wtrysku i wytłaczania
Pasta żywicy azotanu celulozy z plastifikatorem, rozpuszczalnikiem, barwnikiem (napelniaczem)	uplastyczniony płat	prasowanie tłoczne	–
		wytłaczanie wstępne	plastifikat do prasowania tloczego i płytowego

Na rys. 3.106 przedstawiono ciąg urządzeń służących do walcowania wstęgi z PVC mającej zastosowanie jako wykładzina podłogowa.



Rys. 3.106. Urządzenie do walcowania wstęgi: 1 - gniotownik 2 i 3 - walcarki wstępne, 4 - przenośnik taśmowy, 5 - przenośnik taśmowy wahliwy, 6 - walcarka formująca, 7 - nóż krążkowy, 8 - bębny chłodzące, 9 - wały przeciągające, 10 - stół kontroli, 11 - wał odbierający

3.5.2. KALANDROWANIE

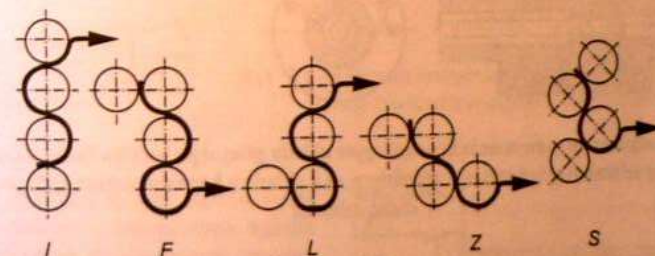
Proces kalandrowania folii jest rozwinięciem opisanego uprzednio procesu walcowania mieszanek. Kalandrowanie polega na ciągłym zasilaniu kalandra wstępnie uplastycznionym tworzywem, które po jednokrotnym przejściu przez kilka szczelin międzywalcowych odbiera się (bezpośrednio lub za pośrednictwem wału wygniatającego wzór) na bębny chłodzące i zwija na wale odbierającym. W wyniku tego procesu otrzymuje się folie. Niekiedy w ostatnią szczelinę międzywalcową kalandra wprowadza się dodatkowo nośnik i wtedy otrzymuje się materiał nakładany (ostatnia para walców ma jednakowe obroty) lub materiał powlekany (ostatnia para walców ma różne obroty).

Elementami roboczymi kalandra są współpracujące ze sobą poziome, równoległe walce, osadzone w odpowiednich łożyskach w konstrukcji nośnej kalandra. Walce obraca układ napędowy, a ich temperaturę reguluje układ termoregulacyjny. Wzajemne położenie walców ustala się za pomocą mechanizmu regulacji szczelin. W skład kalandra wchodzi także pomocnicze urządzenia technologiczne (regulujące zasilanie, ograniczające szerokość kalandrowania, obcinające brzozy, odbierające folie z kalandra i ewentualnie przeprowadzające dalszą jej obróbkę) oraz urządzenia zapewniające ciągłą pracę kalandra. Prawidłowość procesu kalandrowania ocenia i reguluje zespół urządzeń kontrolno-pomiarowych.

W przemyśle stosuje się kalandry o dwóch, trzech, czterech, a nawet pięciu walcach. Kalandry dwu- i trójwalcowe mają ograniczony zakres zastosowań; najczęściej są używane do produkcji wykładzin podłogowych, przy czym kalandry dwuwalcowe ustawia się wraz z innymi urządzeniami w szereg stanowiący linię produkcyjną. Kalandry pięciowalcowe były uważane za najwłaściwsze urządzenia do produkcji folii z twardego PVC. Obecnie, przy udoskonalonych metodach zasilania i wyższych temperaturach pracy, wymagania tej

produkcji spełniają zadowalająco kalandry czterowalcowe. Są one najbardziej rozpowszechnione, gdyż można je stosować do produkcji różnego rodzaju folii z kauczuków i mieszanek gumowych, PVC miękkiego i twardego oraz innych termoplastów (PVDC, PIB, ABS), folii zdwajanych, folii wzmacnianych, tkanin i papierów powlekanych, niektórych typów wykładzin podłogowych, a nawet płyt. Z tego względu stanowią one poważną większość produkowanych obecnie kalandrów.

Kalandry czterowalcowe mają różne wzajemne usytuowanie walców, czyli tzw. „konfigurację”, którą oznacza się umownie literami alfabetu łacińskiego, najbardziej przypominającymi kształtem układ walców w kalandrze. Typowe konfiguracje kalandrów czterowalcowych przedstawia rys. 3.107. Konfiguracja „I” ma tę zaletę, że siły działające na walce w czasie pracy leżą w jednej płaszczyźnie, a obciążenia zginające częściowo się znoszą. W ocenie tego układu przeważały jednak jego niedostatki technologiczne – utrudnione zasilanie szczeliny między dwoma walcami ustawionymi w płaszczyźnie pionowej, a także skomplikowana regulacja szerokości szczelin. Konfiguracje „L” i „F”, które można uznać za równorzędne, stanowią kompromis między wymaganiami konstrukcyjnymi i technologicznymi; większość sił działających na konstrukcję kalandra układa się w jednej płaszczyźnie, zasilanie pierwszej szczeliny jest wygodne i łatwe do zautomatyzowania, a regulacja rozstawienia walców – stosunkowo prosta. W niektórych procesach technologicznych znajdują zastosowanie kalandry o konfiguracjach „S” lub „Z”. W kalandrach tych starano się uzyskać optymalne własności technologiczne (dostęp do wszystkich szczelin, skrócony do minimum czas stykania się tworzywa z walcami, możliwość łatwego zasilania dwóch szczelin) za cenę komplikacji konstrukcyjnych, spowodowanych wielokierunkowym rozkładem sił występujących podczas kalandrowania. Kalandry o konfiguracji „Z” i „S” są cięższe i droższe niż „L” i „F”.

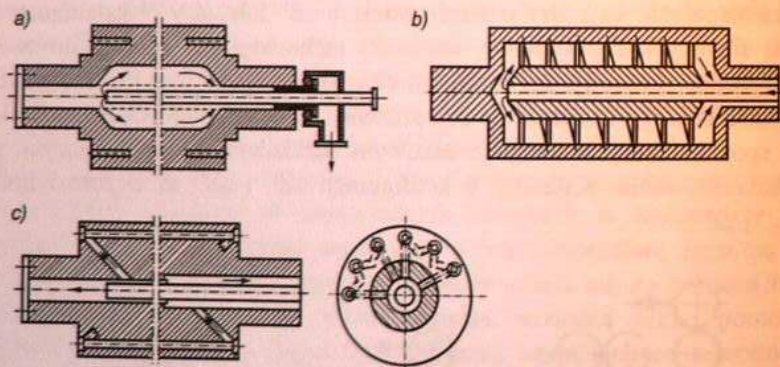


Rys. 3.107. Najczęściej spotykane konfiguracje walców w kalandrach czterowalcowych: I, F, L, Z, S

Podstawową część kalandra stanowią walce o dużej gładkości części roboczej $R_a = 0,25 \mu m$ i twardości $48 \div 55 HRC$. Podczas pracy podlegają one działaniu dużych sił zginających, stanowiących źródło obciążeń konstrukcji kalandra i przyczynę ugięć walców. W celu zmniejszenia ugięć zachowuje się

bardzo duży stosunek średnicy do długości roboczej walców, zbliżony do 1:2,5. Walce łożyskowe tocznie spoczywają w obudowie składającej się z dwóch bocznych konstrukcji nośnych, połączonych ze sobą wspólną podstawą i łącznikiem górnym. Bardzo ważną rolę spełnia układ obiegowy oleju, smarujący łożyska główne kalandra, w skład którego wchodzi: chłodnica wodna i grzejnik elektryczny – sterowane przez termoregulator. Zapewnia to stałą optymalną temperaturę pracy łożysk. Każdy z walców kalandra jest napędzany oddzielnym silnikiem elektrycznym o bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej (układy Warda-Leonarda, tyrystorowe) poprzez przekładnię o stałym przełożeniu. Umożliwia to dobór prędkości obwodowej walców ($0,3 \div 2$ m/s) oraz frykcji, której wartość przy kalandrowaniu tworzyw termoplastycznych wynosi $1,03 \div 1,15$, zaś w niektórych przypadkach kalandrowania kauczuków i mieszanek gumowych 1,5 i więcej. Zblokowany zespół napędowy spoczywa na osobnym fundamencie i jest połączony z czopami walców za pomocą wałów przegubowych.

Walce kalandra są wyposażone w indywidualny system termoregulacyjny składający się z podgrzewaczy wody ogrzewanych elektrycznie, chłodzonych wodą wymienników ciepła, pomp oraz aparatury kontrolno-pomiarowej. Przegrzana woda pod ciśnieniem doprowadzana jest możliwie jak najbliżej powierzchni roboczej walców (rys. 3.108).

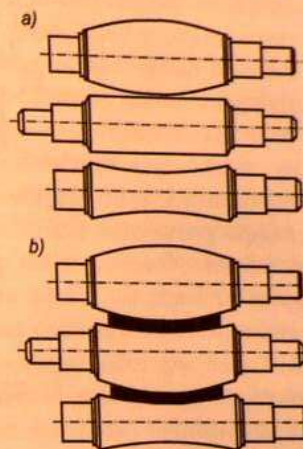


Rys. 3.108. Podstawowe rozwiązania konstrukcyjne układu grzejnego walców kalandra: a) z komorą centralną, b) ze śrubowym kanałem centralnym, c) z układem kanałów wierconych pod powierzchnią roboczą

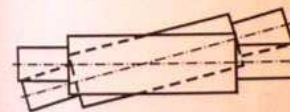
Kalandrowanie folii o określonej grubości (z zakresu $0,08 \div 1$ mm) połączone jest z koniecznością niezależnej regulacji szczelin międzywalcowych. Służą do tego napędzane elektrycznie mechanizmy śrubowe (wyposażone w bezpieczniki płytkowe chroniące walce przed uszkodzeniem) umieszczone po obu stronach każdego walca w konstrukcji nośnej. Aktualną szerokość szczelin można odczytać na wyskalowanych pierścieniach mechanizmów śrubowych

oraz wskaźnikach zainstalowanych w pulpicie sterowniczym. Omówiony sposób regulacji szczelin zapewnia jedynie utrzymanie stałej grubości folii mierzonej wzdłużnie, nie gwarantuje natomiast jednakowego rozkładu grubości folii mierzonej poprzecznie, co jest wynikiem wspomnianego wcześniej ugięcia walców kalandra. W celu zrównoważenia ugięcia walców, ich roboczej powierzchni nadaje się postać beczkowatą o kształcie wyznaczonym przez fragmenty paraboloidy (jest to tzw. „bombaż”). Rozwiązanie takie dla układu trójwalcowego „I” pokazano na rys. 3.109.

Powstające w toku pracy kalandra ugięcia walców kompensowane przez stały „bombaż” powinny być uzupełniająco korygowane przez bezstopniowe systemy. Najczęściej stosowane są (przeważnie jednocześnie) dwa sposoby regulacji. Pierwszy z nich, tzw. krzyżowanie walców (rys. 3.110), polega na wichrowaniu osi jednego z walców w stosunku do równoległych osi obu walców sąsiednich, przez co regulacji podlega kształt dwóch szczelin. Wichrowanie uzyskuje się przez jednoczesne przesunięcie opraw łożysk w przeciwnych kierunkach za pomocą klinów napędzanych silnikami elektrycznymi. Drugim sposobem bezstopniowego korygowania szczeliny jest wywołanie sił zginających walce w kierunku przeciwnym do sił działających na nie w czasie kalandrowania folii. W tym celu na przedłużonych czopach walców umieszcza się łożyska pomocnicze i obciąża się je w żądanym kierunku przez działanie odpowiednimi urządzeniami hydraulicznymi (rys. 3.111) lub sprężynowymi o regulowanej sile.

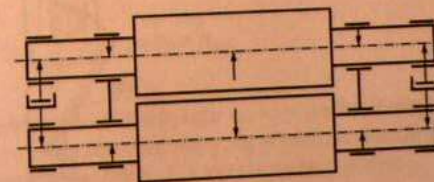


Rys. 3.109. Walce kalandra w układzie trójwalcowym „I” z bombażem: a) kształt poszczególnych walców, b) współpraca walców podczas kalandrowania

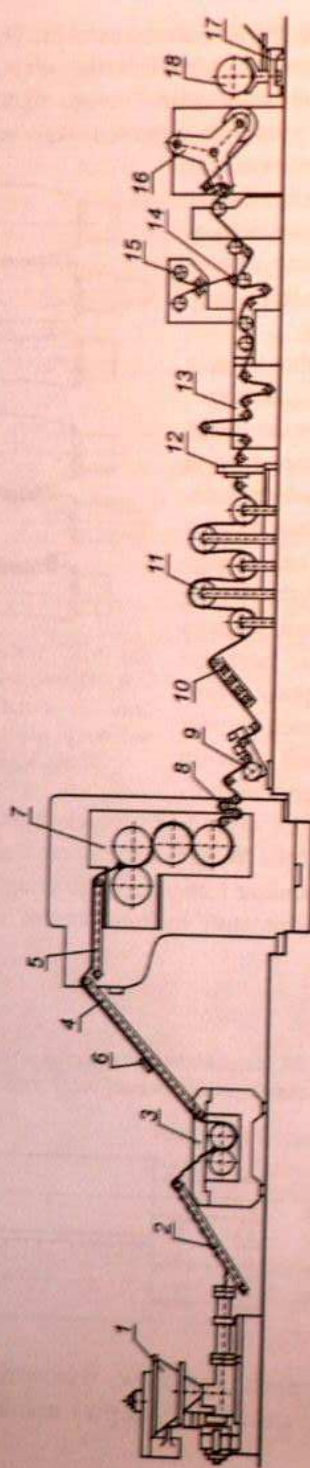


Rys. 3.110. Metoda kompensacji ugięcia walców przez przekoszenie (zwichrowanie) osi jednego z nich

Rys. 3.111. Schemat układu walców (trzęcego i czwartego) z kompensacją ugięcia poprzez wywołanie sił zginających przeciwnie skierowanych w stosunku do osi pochodzących od nacisku jednostkowego i ciężaru walców

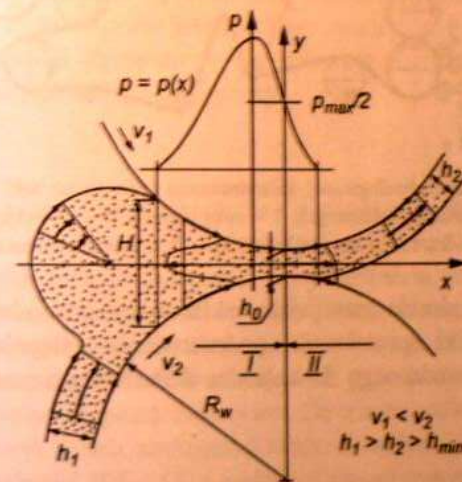


Łączne wykorzystanie omówionych sposobów wyrównywania grubości folii umożliwia utrzymanie jej w granicach $\pm 2 \mu\text{m}$ przy nominalnej jej grubości $100 \mu\text{m}$.



Rys. 3.112. Schemat linii technologicznej kalandrowania tłoczonego PVC (twardego o wydajności 650 kg/h (grubość folii 0,6 mm, szerokość 2 m): 1 – wytłaczarka, 2 – przenośnik taśmowy, 3 – walcarka, 4, 5 – przenośniki taśmowe, 6 – wykrywacz metali, 7 – kalander, 8 – urządzenie odbierające folię, 9 – urządzenie do tłoczenia wzoru, 10 – urządzenie do orientacji molekularnej, 11 – urządzenie do wstępnego ochładzania, 12 – urządzenie do bezstykowego pomiaru grubości folii, 13 – urządzenie do ochładzania ostatecznego, 14 – noże krawkowe do obcinania brzegów folii, 15 – urządzenie do zwijania obciętych brzegów, 16 – urządzenie do zwijania folii, 17 – wózek do transportowania zwojów folii 18

Współczesne kalandry, umieszczone w linii technologicznej (rys. 3.112), są przy produkcji folii zasilane w sposób ciągły gorącym surowcem w postaci pręta (z wytłaczarki) lub taśmy (ścinanej z walcarki). Do pierwszej szczeliny doprowadza się tworzywo transportem taśmowym, którego koniec, poruszając się ruchem wahadłowym, rozprowadza je równomiernie po całej roboczej długości szczeliny. W transporter wbudowuje się przeważnie detektor metali, który wykrywa i sygnalizuje zanieczyszczenia tworzywa metalem, zabezpieczając walce kalandra przed uszkodzeniem. Roboczą szerokość pierwszej szczeliny kalandra reguluje się dwoma ogranicznikami klinowymi, dopasowanymi do powierzchni pierwszego i drugiego walca. Zasilanie szczeliny międzywalcowej tworzywem nie jest nigdy idealne, jeżeli chodzi o równomierność rozkładu jego masy wzdłuż długości szczeliny oraz temperatury. Dogrzanie oraz wyrównanie temperatury uzyskuje się dzięki dodatkowemu mieszaniu materiału w poszczególnych szczelinach między walcami. Mieszanie to jest efektywne tylko wtedy, gdy przed szczeliną gromadzi się niewielki nadmiar mieszanki w postaci cienkiego wałeczka zajmującego całą roboczą długość walców (rys. 3.113). Niepożądany jest duży nadmiar materiału w szczelinie, gdyż może spowodować powierzchniowe straty ciepła, oraz na skutek zbyt długiego przebywania mieszanki w kalandrze, jej rozkład termiczny. Za mały nadmiar materiału w szczelinie może spowodować lokalny zanik wałeczka (najczęściej na brzegach), co prowadzi do powstania wad w wyrobie.



Rys. 3.113. Szczelina międzywalcowa podczas kalandrowania z frykcją: v_1 , v_2 – prędkości obwodowe walców; I – czynna strona szczeliny, II – bierna strona szczeliny, h_0 – wielkość szczeliny, h_1 , h_2 – grubości folii odpowiednio przed i za szczeliną (h_0), $p(x)$ – rozkład ciśnień

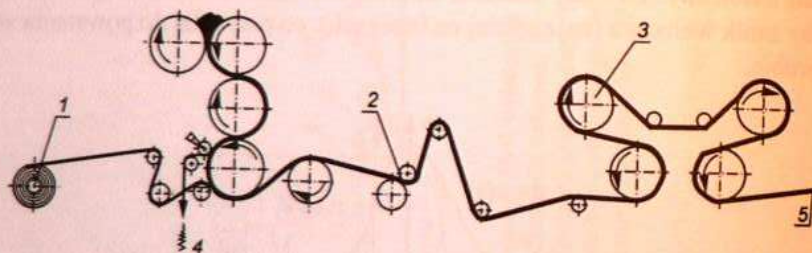
Zasilanie kalandra komplikuje się znacznie przy produkcji materiałów wielowarstwowych, jak np. folie zdwabiane, tkaniny powlekane, folie wzmacniane siatką, papiery powlekane (tabl. 3.14). Poza surowcem podstawowym zasilają

Tablica 3.14

Niektóre materiały stosowane w kalandrowaniu nakładającym

Łączone materiały		Przeznaczenie
tworzywo	inny materiał	
polichlorek winylu zmiękczone	papier	tapety ściennie do budownictwa
polichlorek winylu zmiękczone	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)

cym pierwszą szczelinę, należy wtedy doprowadzić do ostatniej szczeliny kalandra pozostałe składniki struktury wielowarstwowej (folie, folie z siatką, tkaniny, papier itp. (rys. 3.114). W tym celu kalandr musi być wyposażony



Rys. 3.114. Schemat linii technologicznej kalandrowania (zdławiania) folii PVC zmiękczonego i papieru w celu otrzymania tapet ściennych: 1 – zwój papieru, 2 – wyciskanie wzoru na tapecie, 3 – walce chłodzące, 4 – obcięte brzegi folii, 5 – tapeta gotowa do zwijania

w odpowiednie urządzenia rozwijające, układ rolek prowadzących i dociskających oraz grzejniki (promienniki podczerwieni) wstępnie podgrzewające powierzchnie doprowadzonego do kalandra dodatkowego materiału w postaci folii tworzywowej.

3.6. SPIENIANIE

Spienianie tworzyw sztucznych polega na wytworzeniu struktury porowatej w ciekłym lub uplastycznionym tworzywie, a następnie na jej utrwaleniu. Proces spieniania może przebiegać w kilku etapach. Końcowy etap spieniania odbywa się zwykle w zamkniętych formach nadających gotowym wyrobom odpowiedni kształt. Tworzywa sztuczne można spieniać także w procesie wtryskiwania, wytłaczania i odlewania na przykład w przestrzeni między ściankami elementu konstrukcji, którą wypełnia. Płyty izolacyjne dla budownictwa kształtuje się w formach, natomiast komory wypornościowe wypełniane są tworzącą się pianką bezpośrednio w grodziach łodzi. W drugim przypadku pianka powinna mieć dobrą przyczepność do ścianek.

Pianki są wytwarzane głównie z polistyrenu i poliuretanu. Pianki z polistyrenu produkowane w Polsce są znane pod nazwą *styropianów*. Są one stosowane masowo w budownictwie jako warstwy izolacyjne. Pianki poliuretanowe – znacznie droższe od styropianów – odznaczają się bardzo wysokimi parametrami jakościowymi i eksploatacyjnymi.

Porofory

Porofory są to substancje chemiczne dodawane do tworzyw sztucznych w celu ich spienienia. Utworzenie pianki polega na rozkładzie poroforu pod wpływem ciepła lub reakcji chemicznej z wydzielaniem gazu – zwykle azotu. Porofor powinien charakteryzować się odpowiednią szybkością reakcji rozkładu w temperaturze zbliżonej do temperatury płynięcia (żelowania) tworzywa oraz wydzielaniem przy rozkładzie dużej ilości gazu obojętnego fizjologicznie i o małej przenikalności przez tworzywo. Do często stosowanych poroforów zalicza się dwunitryl kwasu azoizomasłowego (Porofor N), N, N'-dimetylo-N, N'-dinitrozotereftalamid (BL-353) i hydrazyd kwasu *p*-hydroksybenzenosulfonowego (Celogene). Ekspandowanie niektórych tworzyw (np. polistyrenu) można wywołać także przez rozkład takich nieorganicznych substancji, jak węgiel lub wodorowęgiel amonowy. Środkiem spieniającym żywice poliuretanowe może być dwutlenek węgla powstający w wyniku reakcji ubocznych podczas reakcji poliaddycji. Przy stosowaniu poroforów o temperaturze rozkładu wyższej od temperatury żelowania pasty należy stosować stabilizatory

pianki, uniemożliwiające jej opadanie do chwili rozpoczęcia żelowania. Przy stosowaniu takich poroforów powstaje większa liczba porów otwartych niż przy użyciu poroforów o niskiej temperaturze rozkładu.

Rodzaje pianek

W zależności od rodzaju zastosowanego tworzywa i sposobu prowadzenia procesu spieniania otrzymuje się różnego rodzaju pianki. Pianki można podzielić na sztywne i elastyczne. Pianki mogą mieć pory zamknięte lub otwarte. Istotną rolę odgrywają w tym przypadku napięcia powierzchniowe. Pianki elastyczne mają zastosowanie jako materace lub gąbki. Te ostatnie mają pory otwarte. Pianki sztywne stosowane są głównie jako izolacje termiczne (budownictwo, lodówki itp.) i elementy konstrukcyjne (konstrukcje sandwichowe, grodzie wypornościowe itp.).

Inną odmianą są *pianki integralne*. Charakteryzują się one zmienną porowatością w przekroju wyrobu. Wewnątrz materiału porowatość jest duża, natomiast w warstwie zewnętrznej silnie maleje w taki sposób, że na samej powierzchni tworzywo nie jest spienione. W ten sposób otrzymuje się wyrób lekki i odporny na naciski powierzchniowe. Pianki integralne wytwarza się w procesie wtryskiwania (najczęściej poliamidu zmieszanego z poroforem) do podgrzanych form wtryskowych.

Spienianie polistyrenu

Najważniejsze metody otrzymywania porowatego polistyrenu polegają na polimeryzacji styrenu w obecności poroforów. Porofory wysycają tworzący się polimer dając materiał nieporowaty, który w toku dalszych operacji przechodzi w postać porowatą. Jeśli proces spieniania odbywa się w temperaturze pokojowej, jako poroforu można użyć dwunitrylu kwasu azoizomasłowego. Po ogrzaniu polimeru do temperatury 100°C otrzymuje się postać porowatą. Najczęściej w skali technicznej używa się zamiast poroforów stałych niskowrzących cieczy. Polimeryzację styrenu w obecności cieczy niskowrzących można przeprowadzać metodą blokową lub perełkową. Otrzymany tymi metodami, wysycony poroforem, polistyren granulowany lub w bloku jest produktem handlowym (rys. 3.115) i można go dalej przetwarzać nadając mu odpowiedni kształt i porowatość w bardzo prostych urządzeniach. Granulki lub blok można przechowywać w odpowiednio niskiej temperaturze i zamkniętych opakowaniach przez kilka miesięcy. Czas przechowywania jest związany z ulatnianiem się poroforu. Ciężar nasypowy polimeru granulowanego wynosi około 500 g/l , zaś gęstość około $1,05\text{ g/cm}^3$.

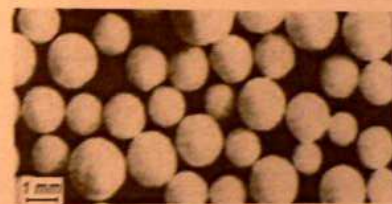
Przetwórstwo granuliek zawierających porofor na wyroby gotowe odbywa się w trzech etapach: 1) ekspandowanie wstępne, 2) sezonowanie, 3) ekspandowanie końcowe.

Ekspandowanie wstępne polega na ogrzaniu perełek do temperatury $95\div 100^{\circ}\text{C}$. Podczas ogrzewania perełki miękną, a zawarty w nich porofor

rozpręża się i tworzy strukturę mikroporowatą. Następuje $40\div 50$ -krotny wzrost objętości tworzywa. Komórki w ten sposób utworzone, zależnie od warunków, mają średnicę $0,05\div 0,3\text{ mm}$. Ekspandowanie wstępne można także zrealizować stosując niskociśnieniową parę gorącej wody. Stosowanie do tych celów gorącego powietrza jest mniej korzystne z uwagi na niską jakość pianki, spowodowaną głównie stratami poroforu. Ponadto czas ekspandowania powietrzem jest $4\div 5$ -krotnie dłuższy od czasu ekspandowania parą wodną lub gorącą wodą. Czas ekspandowania ogrzaną do 95°C wodą wynosi $10\div 15\text{ min}$ i zależy od objętości wyrobu. Podczas tego procesu należy wodę z perełkami stale mieszać. Ciężar objętościowy pianki wytworzonej za pomocą pary wodnej jest najmniejszy i wynosi 20 kg/m^3 . Ekspandowanie parą wodną może odbywać się w autoklawach lub naczyniach otwartych. Ekspandowanie gorącą wodą trwa dłużej niż parą wodną, jednakże pozwala na regulowanie ciężaru objętościowego w granicach do 300 kg/cm^3 . W wyniku wstępnego ekspandowania otrzymuje się białe, regularne kuleczki średnicy do kilkunastu milimetrów (rys. 3.116). Granulki te należy następnie krótkotrwale suszyć w temperaturze $40\div 45^{\circ}\text{C}$ lub przez dłuższy czas w temperaturze pokojowej. Podczas ekspandowania ciężar nasypowy (ciężar objętościowy) perełek stopniowo maleje. Poprzez kontrolę tego ciężaru w czasie procesu możliwe jest uzyskanie wyrobu o odpowiedniej gęstości.



Rys. 3.115. Granulki styropianu przed spienieniem



Rys. 3.116. Granulki styropianu po spienieniu

Następnym etapem otrzymywania wyrobów z porowatego polistyrenu jest sezonowanie. Polega ono na umieszczeniu ekspandowanych perełek w zbiorniku – silosie mającym swobodny dostęp powietrza. Czas sezonowania wynosi od kilkunastu godzin do 7 dni. Czas ten jest krótszy dla materiału cięższego i powiększa się dla materiałów cięższych. Na przykład dla perełek o ciężarze nasypowym $500\div 100\text{ kg/m}^3$ czas sezonowania wynosi $6\div 12$ godzin, natomiast dla perełek o ciężarze nasypowym $15\div 20\text{ kg/m}^3$ wynosi $2\div 6$ dni.

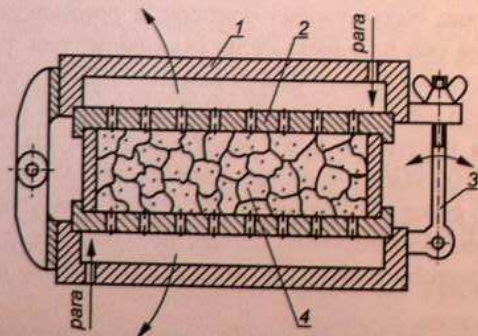
W trzecim etapie ekspandowania perełek otrzymuje się gotowy przedmiot, którym mogą być wyroby o niemal dowolnym kształcie lub płyty o znacznych wymiarach.

Proces ekspandowania bloków z polistyrenu z poroforem jest zbliżony do ekspandowania granuliek. Najczęściej ekspandowanie odbywa się w gorącej wodzie. Po wyjęciu z wody, gdy materiał jest jeszcze plastyczny, płyty mogą

być wyrównywane lub do pewnego stopnia formowane pod ciśnieniem. Po kilkudniowym sezonowaniu płyty poddaje się końcowemu ekspandowaniu. Następuje przy tym kolejny wzrost objętości o 50÷100%. Formowanie przedmiotów o ciężarze objętościowym powyżej 100 kg/m³ można przeprowadzać bez wstępnego ekspandowania.

Praktycznie proces wytwarzania pianek przeprowadza się w ten sposób, że formę wypełnia się szczelnie wstępnie ekspandowanymi perełkami i po jej zamknięciu doprowadza parę, lub formę umieszcza się w komorze parowej. Parę doprowadza się pod ciśnieniem 0,2÷0,3 MPa tak długo, aż uzyskana zostanie temperatura rzędu 110÷115°C i nadciśnienie 0,05÷0,08 MPa. Czas formowania wynosi od kilkunastu sekund do kilku minut zależnie od grubości ścianek formowanego przedmiotu. Decyduje tu wymiar najgrubszej ścianki. Jeżeli ciężar objętościowy wyrobu ma wynosić mniej niż 50 kg/m³, wówczas należy stosować parę wodną; w przeciwnym przypadku – gorącą wodę. Aby nie dopuścić do przyklejenia się pianki do ścianek formy, smaruje się jej powierzchnie robocze odpowiednimi smarami, jak na przykład wazeliną, olejem silikonowym. Można też powierzchnie formy wyłożyć tkaniną z perlonu, bawełny lub włókien szklanych. Stosowanie tkanin ma tę zaletę, że powierzchnie wyrobu mają szorstką powierzchnię ułatwiającą przyczepność zapraw murarskich. Po zakończeniu procesu forma zostaje ostudzona powietrzem lub, jeśli ciężar objętościowy jest większy od 25 kg/m³, wodą. Stosowanie wody przy chłodzeniu lekkich pianek prowadzi do nadmiernego skurczu i możliwości powstania deformacji wyrobu.

Formy do produkcji styropianu mają zwykle prostą konstrukcję (rys. 3.117). Zwykle są wykonywane z blachy aluminiowej lub stalowej o grubości 3÷6 mm. Przy dużych powierzchniach formy są wzmacniane żeberkami. Ścianki form mają otwory o średnicy 1,5 mm rozmieszczone w odległości około 1÷2 cm. Formy są dwu- lub wielodzielne. Celem zwiększenia wytrzymałości wyrobu często do formy wkładane są elementy wzmacniające, jak siatki metalowe, haki do przytrzymywania itp.



Rys. 3.117. Przykład formy do wytwarzania wyrobów ze styropianu: 1 – obudowa formy, 2 – ścianka perforowana, 3 – śruba mocująca, 4 – element formowany

Spienianie poliuretanu

Pianki poliuretanowe należą do najwyższej klasy izolacji termicznych. Są też znacznie droższe od styropianu. Ich podstawową zaletą jest odporność na działanie czynników atmosferycznych, dzięki czemu odznaczają się dużą trwałością. W Polsce pianki są wytwarzane z żywicy poliuretanowych o ogólnej nazwie Poles. Istnieje kilka odmian tego typu żywicy, w związku z czym nazwa ta jest stosowana z oznaczeniem liczbowym, na przykład Poles 1. Porofofor ekspanduje w wyniku reakcji chemicznej, która przebiega bardzo gwałtownie z wydzielaniem się dużej ilości ciepła. Początek reakcji następuje po zmieszaniu dwóch składników: A i B. Jednocześnie zachodzi proces utwardzania się poliuretanu i proces spieniania. Duża szybkość reakcji powoduje konieczność stosowania urządzeń mieszających i natychmiast wprowadzających mieszaninę do formy lub wypełnianej pianką przestrzeni. Podstawowa technika wytwarzania wyrobów z poliuretanów polega na utwardzaniu żywicy poliuretanowych drogą reakcji chemicznej na przykład poliestrów z izocjanianami. Dzięki zestawianiu składników kompozycji i doborowi ich proporcji istnieje możliwość określania w szerokich granicach własności użytkowych (na przykład twardości) tak wytwarzanych wyrobów.

3.7. FORMOWANIE BEZCIŚNIENIOWE

Termin *formowanie bezciśnieniowe* określa metody wytwarzania wyrobów z tworzyw sztucznych stosowane w warunkach ciśnienia atmosferycznego lub ciśnienia roboczego nie przekraczającego 0,2 MPa. Formowanie bezciśnieniowe jest stosowane głównie przy wykonywaniu elementów odlewanych oraz laminatów. Laminaty należą do grupy tworzyw kompozytowych (kompozytów). Kompozyt jest to mieszanina co najmniej dwóch materiałów różniących się między sobą w sposób istotny własnościami fizykochemicznymi. Jeden ze składników (osnowa) spełnia rolę spoiwa. Między składnikami kompozytu nie zachodzi reakcja chemiczna. Kompozytem jest na przykład mieszanina włókien szklanych i żywicy poliestrowej. Po zmieszaniu tej żywicy z utwardzaczem następuje reakcja utwardzania – taki skład nazywamy kompozycją. Własności użytkowe kompozytu zależą od jego struktury, udziału masowego składników i charakterystyk fizykochemicznych użytych materiałów. Duże znaczenie ma także współdziałanie spoiwa z pozostałymi składnikami kompozytu, które zależy od zjawisk adhezyjnych na powierzchniach granicznych. Celem polepszenia adhezji i zwilżalności na powierzchnię włókien nakładana jest warstwa pośrednia (apretura) właściwa dla określonego zestawu użytych materiałów. Przez dobór składu można w szerokich granicach wpływać na takie cechy kompozytu, jak wytrzymałość, odporność na działanie czynników chemicznych i atmosferycznych, odporność termiczną, wygląd, własności elektryczne itp. Spoiwem w kompozytach są zwykle utwardzalne żywice syntetyczne: poliestrowe, epoksydowe lub fenolowe. Tworzywa kompozytowe wyróżniają się wysokim stosunkiem wytrzymałości do gęstości (wytrzymałością właściwą).

Własności spoiw przedstawiono w tabl. 3.15. Kompozyty z termoplastycznym spoiwem poliamidowym, na przykład itamidy, są przetwarzane metodą wtryskiwania. Pozostałe składniki mogą mieć postać włókien, proszku lub pasty. Wysoką wytrzymałość mechaniczną kompozytów uzyskuje się głównie przez zastosowanie materiałów włóknistych. Optymalne wykorzystanie właściwości włókien uzyskuje się w przypadku ułożenia ich zgodnie z kierunkami naprężeń głównych i proporcjonalnie do ich wielkości. Możliwe jest wtedy zminimalizowanie masy wyrobu.

W większości typowych wyrobów jako wzmocnienie stosowane jest włókno szklane typu E (niskoalkaliczne) o średnicy $\sim 9 \mu\text{m}$. W konstrukcjach kompozyto-

wych spełniających wysokie wymagania techniczne (technika raketowa, lotnictwo, samochody sportowe itp.) stosuje się włókna węglowe, aramidowe, borowe, wiskersy (mające strukturę kryształu), metalowe itd. Podstawowe własności włókien zawarte są w tabl. 3.16–3.18. Włókna są produkowane w postaci mat, tkanin, rowingu (włókno ciągłe) lub jako włókna cięte o określonej długości. Z uwagi na małą średnicę, włókna są łączone w pasma lub wiązki. Grubości mat i tkanin oraz średnicy wiązki rowingu nie można zmierzyć bezpośrednio. Zamiast grubości podawana jest gramatura. Gramatura jest to masa (w gramach) maty lub tkaniny o powierzchni 1 m^2 .

Tablica 3.15

Własności wybranych spoiw stosowanych w kompozytach

Material	Temperatura stosowania [°C]	Wydłużenie przy zerwaniu [%]	Wytrzymałość na zerwanie
Żywice poliestrowe	< 80	1–3	30–60
Estry winylowe (V)	< 100	4–6	80
Żywice epoksydowe	120–230	2 > 10	50–100
Żywice fenolowe	150–230	0,3–1	20–60
Poliimidy (PI)	200–310	2 > 10	80–100
Polipropylen (PP)	< 100	20–800	30–40
Poliamid (PA)	70–130	40–500	40–60
Polieterosulfon (ES)	200	40–80	80–90
Polieteroczeroketon (PEEK)	240–260	40–80	80–90
Polifenylenosulfid (PPS)	240		75

Rowing jest to włókno ciągłe, którego włókna elementarne są połączone w wiązki. Miara grubości wiązki włókien ciągłych jest tex. Tex jest to masa (w gramach) wiązki rowingu o długości 10 km. W celu zapobieżenia rozsypywaniu się włókien są one sklejone łatwo rozpuszczającym się w spoiwie lepiszczem. Wiązki mogą się składać z $1 \div 32$ pasm. Każde pasmo składa się z włókien elementarnych w liczbie będącej wielokrotnością 51. Włókno może przenosić wyłącznie współosiowe naprężenia rozciągające.

Tkanina jest strukturą odpowiednio splecionych ortogonalnie wiązek rowingu. Tkaniny techniczne (do laminatów) mają gramaturę w granicach $40 \div 1600 \text{ g/m}^2$. Stosunek liczby włókien w obu kierunkach splotu może wahać się od 1:1 do 1:16, co umożliwia optymalne wykorzystanie wytrzymałości tkaniny. Z uwagi na łatwiejsze przesycanie spoiwem zwykle są stosowane tkaniny o splotie satynowym. Specyficzną odmianą są tkaniny jednokierun-

kowe złożone z równoległe ułożonych pasm rowingu i niewielkiej liczby włókien poprzecznych zapobiegających jedynie przemieszczaniu się pasm równoległych. Tkaniny te, zwane także rowingowymi, są stosowane w konstrukcjach o bardzo wysokich wymaganiach wytrzymałościowych. Wytrzymałość laminatu z tkaniny zależy od kierunku działania obciążenia i ma charakterystykę ortogonalną, której kształt zależy od proporcji liczby włókien w obu kierunkach spłotu tkaniny. Ze względu na międzywarstwowe naprężenia ścinające zaleca się rozdzielanie warstw tkanin warstwami maty albo stosowanie tkanin lub mat o specjalnym splocie przestrzennym. Nie zaleca się stosowania tkanin w warstwach zewnętrznych laminatów.

Mata jest strukturą składającą się z ułożonych w różnych kierunkach odcinków rowingu. Długość odcinków waha się zwykle od 3 do 5 cm. Włókna są sklejone łatwo rozpuszczalnym w spoiwie lepiszczem. Gramatura mat wynosi $150 \div 1600 \text{ g/m}^2$. Pierwsza warstwa laminatu powinna być warstwą maty o niskiej gramaturze. Istnieją specjalne maty powierzchniowe o gramaturze $20 \div 40 \text{ g/m}^2$. Stosuje się je do wzmacniania warstw zewnętrznych laminatów (żelkotów) odznaczających się dużą zawartością spoiwa. Napełniacze są składnikami kompozytów, wpływającymi przede wszystkim na takie własności, jak własności cieplne, trwałość, barwa, twardość powierzchni itp. Najczęściej są to materiały pochodzenia mineralnego, takie jak kreda, talk, piasek oraz proszki metalowe, pigmenty, pasty pigmentowe, stabilizatory itd.

Utwardzanie żywic może się odbywać przez ich podgrzanie (utwardzanie termiczne lub termoutwardzanie) bądź na drodze reakcji chemicznej (utwardzanie chemiczne lub chemoutwardzanie). Termoutwardzanie stosuje się głównie przy prasowaniu „na gorąco” kompozytów z żywic fenolowych. Jest to technologia wymagająca użycia wysokich ciśnień. Utwardzanie na drodze chemicznej, zwane też „utwardzaniem na zimno”, odbywa się zwykle w temperaturze $16 \div 25^\circ\text{C}$. Stosowane jest głównie w przetwórstwie żywic i kompozytów epoksydowych oraz poliestrowych. Reakcja utwardzania ma charakter egzotermiczny. Prędkość utwardzania wzrasta ze wzrostem temperatury żywicy. Wraz ze wzrostem temperatury utwardzania pogarszają się własności użytkowe kompozytu wskutek zwiększania się skurczu polimeryzacji i naprężeń wewnętrznych.

METODY BEZCIŚNIENIOWEGO FORMOWANIA TWORZYW SZTUCZNYCH

Odlewanie

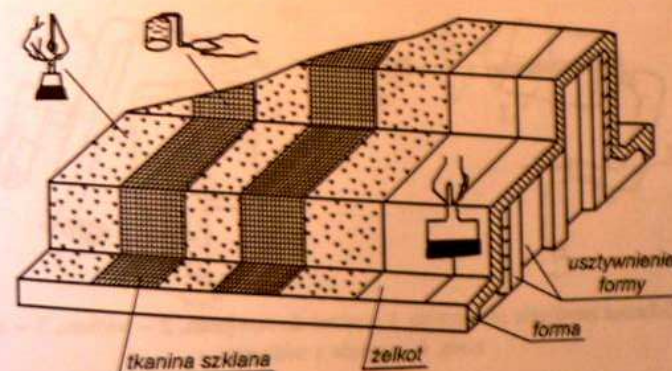
Polega na wypełnieniu przestrzeni roboczej formy ciekłą kompozycją polimeru. Przy odlewaniu żywic należy uwzględnić takie zjawiska, jak skurcz polimeryzacji i łatwość zapęcherzania się wyrobu. Zapobiega się temu przez

staranny dobór typu żywicy, temperatury odlewania, sposobu utwardzania, składu masy odlewanej i konstrukcji formy. Obniżenie ciśnienia ułatwia usuwanie pęcherzy. Powierzchnie robocze formy muszą być uprzednio pokryte warstwą rozdzielającą zapobiegającą przyklejaniu się wyrobu.

Do odlewania produkowane są specjalne typy żywic, odznaczające się niskim szczytem termicznym utwardzania i małym skurczem (na przykład żywica poliestrowa Polimal 150). Technologia odlewania jest stosowana głównie do impregnowania uzwojeń urządzeń elektrycznych, wykonywania próbek do badań, i drobnych elementów, np. gałek dźwigni zmiany biegów itp.

Laminowanie

Jest metodą wytwarzania wyrobów o strukturze warstwowej (rys. 3.118). Kształt wyrobu jest odwzorowaniem negatywowym powierzchni roboczej formy. Warstwy żywicy syntetycznej i włókien są nakładane kolejno na powierzchnię roboczą formy w sposób zapewniający dokładne zwilżenie żywicą powierzchni włókien, wyeliminowanie pęcherzy powietrza, utrzymanie odpowiedniej proporcji składników i wymagane ukierunkowanie włókien w kompozycie. Powierzchnie formy muszą być uprzednio zabezpieczone przed przyklejeniem się wyrobu. Włókna mogą mieć postać maty, tkaniny lub rowingu. Formy są zwykle wykonywane z laminatu tego samego typu co wyrób. W zależności od uwarunkowań technicznych i ekonomicznych mogą być stosowane także inne materiały, jak drewno, gips, metal itd. Rodzaj użytego materiału wpływa na trwałość formy.



Rys. 3.118. Podstawowa struktura laminatu

Podstawowe metody wytwarzania laminatów:

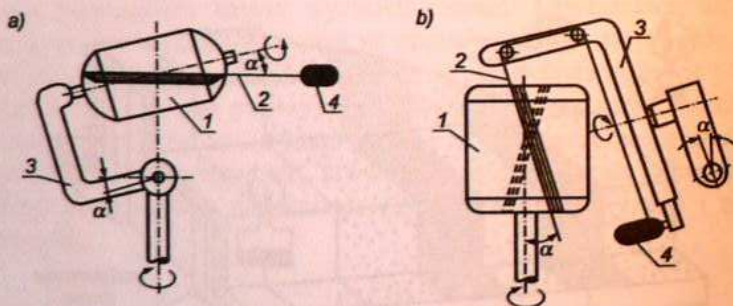
Metoda ręczna

Jest metodą wytwarzania laminatów przy wykorzystaniu siły ludzkiej. Charakteryzuje się niskimi kosztami oprzyrządowania. Jest stosowana do produkcji wyrobów o różnych wymiarach i kształtach (jachty, karoserie, obu-

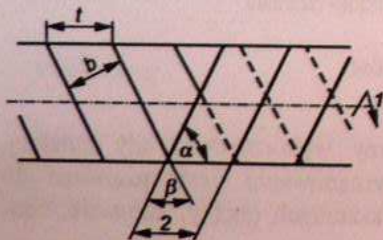
dowu (np.). Podstawowymi parametrami są: kształt płaskie i okrągłe różnych rozmiarów, dobierane w zależności od wielkości i kształtu wyrobu, oraz wałki moherowe, włosowe i rowkowane. Do nakładania warstw zewnętrznych (żelkotów) używane są wałki piankowe. Do cięcia mat, tkanin i rowingu używa się nożyc lub noży stalowych. Jakość laminatu zależy głównie od umiejętności pracownika.

Metoda nawijania

Metoda nawijania jest zmechanizowanym sposobem wytwarzania laminatów. Stosowana jest głównie do produkcji wyrobów o wysokich wymaganiach wytrzymałościowych, mających zwykle kształt kołosymetryczny, jak rury, zbiorniki, obudowy (np. rakiet) itp. Podstawowym urządzeniem są nawijarki, w których warstwy włókien są nawijane na zewnętrzną powierzchnię formy (rdzenia) pod ściśle określonym kątem zależnym od synchronizacji ruchu obrotowego rdzenia i posuwisto-zwrotnego ruchu suportu. Do nawijania wyrobów o wysokiej wytrzymałości stosowany jest rowing, w przypadku którego można uzyskać także bardzo wysoką (wagową) zawartość włókna w laminacie w granicach 70÷95%. Rzadziej używane są tkaniny, a zwłaszcza maty. Przesycanie włókien spoiwem odbywa się zwykle w specjalnej wannie przymocowanej do suportu nawijarki. Do nawijania włókien w kierunku zbliżonym do osi rdzenia stosuje się nawijarki planarne (rys. 3.119). Schemat kinematyczny nawijarki do produkcji rur i zbiorników nawijanych włóknami pod kątem większym niż 30 stopni w stosunku do osi rdzenia przedstawiono na rys. 3.120.



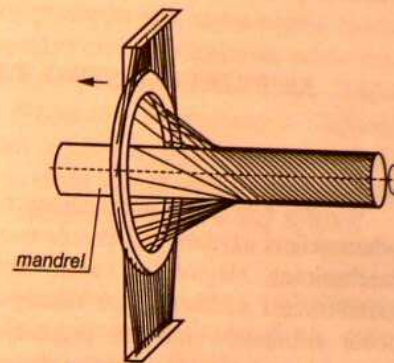
Rys. 3.119. Schemat nawijania planarnego: 1 – rdzeń do nawijania, 2 – włókno, 3 – ramię obrotowe, 4 – szpula z włóknem



Rys. 3.120. Schemat kinematyczny nawijarki do produkcji rur i zbiorników: 1 – ruch obrotowy rdzenia, 2 – ruch posuwisto-zwrotny prowadnicy; t – skok jednego nawoju, b – szerokość nawoju, α – kąt nawijania, β – kąt skrzyżowania włókien

Metoda natryskowa

W metodzie natryskowej cięty rowing i żywica są równocześnie nakładane na powierzchnię formy. Cięcie rowingu na odcinki 2÷3 cm jest zsynchronizowane z natryskiem żywicy z dwóch pistoletów pneumatycznych. Jeden pistolet służy do natrysku żywicy zmieszanej z utwardzaczem, drugi – żywicy z katalizatorem. Przyrząd do cięcia rowingu i pistolety natryskowe są zamocowane na jednym korpusie, który może być przesuwany ręcznie lub mechanicznie. Ułożenie włókien wzmacniających jest takie, jak przy użyciu mat. Metoda natryskowa jest stosowana przede wszystkim do produkcji wyrobów o dużej powierzchni, np. produkcji dużych zbiorników metodą odśrodkową, w przypadku której na wewnętrzną powierzchnię obracającą się cylindrycznej formy natryskiwana jest żywica i cięty rowing. Pistolety pneumatyczne i urządzenie tnące wykonują ruchy posuwisto-zwrotne, równoległe do osi obrotu rdzenia.



Rys. 3.121. Wzmacnianie rury z tworzywa termoplastycznego warstwą laminatu metodą nawijania

Celem zwiększenia wytrzymałości rur z tworzyw termoplastycznych owija się je często laminatem, na przykład w sposób pokazany na rys. 3.121.

3.8. PRZETWÓRSTWO TWORZYW WZMOCNIONYCH

Wyroby z tworzyw wzmocnionych (kompozytów) odznaczają się wysokimi własnościami użytkowymi, przede wszystkim ze względu na dużą wytrzymałość mechaniczną, sztywność, stałość wymiarów itp. Cenną zaletą jest łatwość kształtowania własności tych tworzyw podczas procesu przetwórstwa poprzez dobór składników lub ich proporcji. Podstawowymi składnikami tworzyw wzmocnionych są spoiwo i wzmocnienie. Dobre własności kompozytów można uzyskać jedynie przez staranny dobór tych składników, gwarantujący ich współpracę w czasie przenoszenia naprężeń. Spoiwem może być tworzywo termoplastyczne lub żywica utwardzalna. W Polsce produkowane są kompozyty będące mieszaniną poliamidu z włóknem szklanym w postaci zgranulowanej pod nazwą *itamidów*. Istnieje szereg odmian itamidów różniących się własnościami użytkowymi. Półfabrykat w postaci granulatu jest wytwarzany metodą wytłaczania. Wyroby z itamidu są zwykle produkowane metodą wtryskiwania.

Przetwórstwo tworzyw wzmocnionych na bazie żywic utwardzalnych polega na ukształtowaniu kompozytu w gorącej formie pod ciśnieniem (prasowanie) a następnie utwardzeniu żywicy pod wpływem ciepła, lub na powierzchni formy (metody bezciśnieniowe) i utwardzeniu spoiwa za pomocą utwardzacza, zwykle w temperaturze normalnej (otoczenia).

RODZAJE SPOIW

Do wytwarzania wyrobów z tworzyw wzmocnionych na bazie żywic utwardzalnych stosowane są żywice poliestrowe, epoksydowe i fenolowo-formaldehadowe. Obecnie coraz częściej są one używane jako żywice modyfikowane, celem uzyskania lepszych własności laminatów. Żywice syntetyczne są odporne na działanie czynników atmosferycznych i większości odczynników chemicznych.

Żywice poliestrowe

Produkowane w Polsce żywice poliestrowe znane są na ogół pod nazwą Polimal. Poszczególne typy tych żywic oznaczone są cyframi, na przykład Polimal 109, Polimal 150 itd. Rozróżnia się następujące grupy żywic poliestrowych:

Żywice konstrukcyjne (Polimal 100 ÷ 120 oraz 146)

Są to 30 ÷ 42% roztwory styrenowe średnio- i wysokoreaktywnych poliestrów otrzymywanych w wyniku kondensacji bezwodników kwasowych z glikolami. Różnią się między sobą stopniem nasycenia oraz sztywnością i w związku z tym często wymagają przy przetwórstwie zastosowania żywic elastycznych, celem obniżenia modułu sprężystości i zwiększenia uduchowienia. Żywice te mają lepkość poniżej 1000 MPa·s w temperaturze 25°C. Dzięki temu są stosowane głównie do wyrobu elementów laminowanych. Lepkość można obniżać przez dodawanie do żywicy styrenu (z wyjątkiem żywicy Polimal 101 i 102). Zawartość styrenu nie powinna jednak przekraczać 42% ze względu na wyraźne pogarszanie się termomechanicznych własności żywicy.

Żywice chemoodporne (Polimal 137, 138 oraz żywica D-23)

Żywice te, zaliczane także do żywic konstrukcyjnych, mają podwyższoną odporność chemiczną. Znajdują zastosowanie głównie do produkcji rur, zbiorników oraz przemysłowej aparatury chemicznej (żywica D-23).

Żywice żelkotowe (Polimal 140, 146)

Żywice te zawierają najczęściej krzemionkę koloidalną jako czynnik tikotropujący uniemożliwiający spływanie żywicy po pionowej ścianie formy. Są to żywice półsztywne i wodoodporne. Mają zastosowanie jako zewnętrzne warstwy laminatów (żelkoty i topkoty) chroniące przed szkodliwym działaniem czynników zewnętrznych, takich jak woda, promienie słoneczne, czynniki mechaniczne (na przykład piasek znajdujący się w wodzie itp.), oraz nadające konstrukcji odpowiedni wygląd zewnętrzny (na przykład barwę). Z tego względu do żelkotu dodawane są odpowiednie substancje, na przykład absorbery ultrafioletu, pigmenty itd.

Żywice elastyczne (Polimal 150 ÷ 154)

Żywice te charakteryzują się podwyższoną odpornością na rozerwanie. Polimal 150 jest wytwarzany na bazie kwasu adypinowego. Są to żywice o małym stopniu nasycenia, mało reaktywne, dzięki czemu obniżony jest pik termiczny podczas utwardzania. Mają zatem niewielki skurcz utwardzania. Są stosowane do dużych elementów odlewanych, mas podłogowych oraz do zalewania obwodów elektrotechnicznych. Żywice te są podstawowym materiałem do wyrobu szpachlówek.

Żywice samogasnące (Polimal 160 ÷ 162)

Żywice te dzięki wprowadzeniu związanego chloru, bromu, fosforu lub antymonu mają własności samogasnące (płomień gaśnie po usunięciu źródła ognia), są trudnozapalne i odznaczają się małą szybkością rozprzestrzeniania się płomienia. Celem dalszego poprawienia własności samogasnących można do nich dodawać takie środki działające synergicznie, jak trójtlenek antymonu Sb₂O₃ lub inne antypireny. Jedynie te żywice mają certyfikat dopuszczający je do stosowania w budownictwie.

Żywice specjalne (Polimal 147, 190, 103 G, 103 S)

Polimal 147 jest roztworem nienasyconego poliestru typu tereftalowego o podwyższonej odporności termicznej. Ma zastosowanie w produkcji tłoczyw, kitów, szpachlówek oraz laminatów poliestrowo-szklanych. Polimal 190 emulguje się w wodzie. Znajduje zastosowanie do uszczelniania porowatych odlewów z metali kolorowych, odlanych pod ciśnieniem. Po nasyceniu nieuszczelnności nadmiar żywicy zmywa się wodą, a pozostała w porach żywicę utwardza w temperaturze $130 \div 135^{\circ}\text{C}$. Polimal 103 S zawiera składniki nadające własności samogaśnięcia i elektroizolacyjne. Znajduje zastosowanie przy produkcji elementów elektronicznych jako masa zalewowa.

Żywice fotopolimerowe (Polimal 194-2, 194-3)

Żywice te różnią się między sobą lepkością i zawartością części nielotnych. Utwardzane są promieniami ultrafioletowymi. Mają zastosowanie do wykonywania form drukowanych na podłożu własnym o grubości $0,9 \pm 0,1$ mm. Trwałość tego typu form wynosi ok. 1 miliona odbitek. Żywice te są czułe na promieniowanie w zakresie $300 \div 400$ μm .

Utwardzanie żywic poliestrowych

Żywice poliestrowe są najczęściej utwardzane chemicznie układem dwuskładnikowym, w którego skład wchodzi utwardzacz i przyspieszacz. Utwardzaczami są najczęściej nadtlarki lub wodoronadtlenki różnych związków chemicznych, jak na przykład nadtlarek benzoilu, wodoronadtlenek ketonu (Ketonox), wodoronadtlenek cykloheksanonu. Przyspieszaczem jest najczęściej naftenian kobaltu. Ten układ utwardzający pozwala regulować czas utwardzania w granicach od kilku minut do kilkunastu godzin. Ilość utwardzacza zależy głównie od temperatury żywicy (otoczenia) i waha się w granicach $2 \div 4\%$ w stosunku do masy żywicy. Przyspieszacz, najczęściej w postaci 1% roztworu Co, jest dodawany do żywicy tuż przed operacją formowania (laminowanie lub odlewanie) kompozytu. Dodawany jest w ilości $0,1 \div 0,4\%$ zależnie przede wszystkim od żadanego czasu utwardzania. W konkretnych warunkach na ilość przyspieszacza może mieć wpływ konstrukcja wytwarzanego elementu (na przykład grubość ścianek), temperatura itd. Przy doborze rodzaju i ilości dodawanego układu utwardzającego należy zawsze brać pod uwagę zalecenia producenta żywicy.

Żywice epoksydowe

Żywice epoksydowe produkowane w Polsce znane są pod nazwą Epidian lub oznaczone literą E. Numer obok tej nazwy lub litery wskazuje na rodzaj żywicy. Otrzymuje się je głównie przez polikondensację dihydroksydwufenylopropanu z epichlorohydryną w środowisku alkalicznym. Poszczególne

typy żywic są otrzymywane w zależności od stosunków molowych substratów oraz warunków, w jakich odbywa się polikondensacja. Różnią się między sobą wielkością cząsteczki oraz liczbą reaktywnych grup epoksydowych. Wielkością charakterystyczną dla żywic epoksydowych jest liczba epoksydowa, która określa zawartość grup epoksydowych w 100 g żywicy. Ma to zasadnicze znaczenie przy ustalaniu właściwej zawartości utwardzacza. Żywice epoksydowe występują w postaci roztworów. Wykazują najlepszą rozpuszczalność w ketonach (na przykład aceton, metyloetyloketon i cykloheksanon), estrach (octan etylu, octan butylu) a ograniczoną – w alkoholach i węglowodorach aromatycznych. Utwardzone żywice epoksydowe mają następujące własności: minimalny skurcz utwardzania, dobrą przyczepność do takich materiałów, jak metale, szkło, ceramika, drewno itd., dobre własności mechaniczne i dielektryczne oraz wysoką odporność chemiczną.

Podstawowymi żywicami epoksydowymi są: E-010, E-011, E-012, E-014 oraz E-1 do E-6. Są one stosowane jako półprodukty głównie do produkcji kitów, klejów, lakierów, spoiw, syciw, szpachlówek i zalew. Żywice E-100 i E-101 są używane jako wysokiej jakości kleje utwardzane na gorąco. E-110 i E-112 są lakierami ochronnymi, zwłaszcza przed korozją. E-111 jest lakierem elektroizolacyjnym. Lakier są produkowane jako dwuskładnikowe. Składniki te miesza się w proporcji 1:1 tuż przed użyciem. E-200, E-202 i E-520 są stosowane jako syciwa przy produkcji laminatów, zwłaszcza w połączeniu z folią miedzianą, do produkcji elektronicznych obwodów drukowanych. E-505 jest stosowany jako masa do wylewania podłóg.

Utwardzanie żywic epoksydowych

Lakier epoksydowe są utwardzane w temperaturze zbliżonej do temperatury pokojowej po zmieszaniu składnika A, którym jest roztwór żywicy w rozpuszczalniku organicznym, ze składnikiem B, którym jest zwykle roztwór poliamidu w rozpuszczalniku organicznym.

Do utwardzania żywic epoksydowych używane są następujące rodzaje utwardzaczy:

- aminy alifatyczne (na przykład trójetylenoceteroamina, znana jako utwardzacz Z-1 lub TECZA);
- aminy aromatyczne (na przykład *m*-fenylenodwuamina, znana jako utwardzacz M);
- addukty amin aromatycznych i alifatycznych oraz ich modyfikacje (na przykład utwardzacz T, Akwanil);
- na bazie poliaminy alifatycznej (utwardzacz TFF);
- poliaminoamidowe (na przykład utwardzacz PAC);
- amidowe (na przykład dwucyanodwuamid (DCDA));
- bezwodniki kwasowe (na przykład bezwodnik kwasu ftalowego – utwardzacz F).

Szybkość reakcji utwardzania wzrasta wraz ze wzrostem temperatury żywicy. Zależy też od stosunku masy utwardzacza do masy żywicy. Należy podkreślić, że utwardzacz Z-1 dodaje się w proporcji stechiometrycznej, co ogranicza możliwość wpływu na własności utwardzonej w ten sposób żywicy. Jego ilość określa się na podstawie zależności:

$$x = 24,3 \text{ LE}$$

gdzie: x – ilość gramów utwardzacza na 100 g żywicy, LE – liczba epoksydowa żywicy, 24,3 – równoważnik gramowy utwardzacza Z-1.

W praktyce najczęściej udział utwardzacza Z-1 wynosi 10% masy żywicy.

Utwardzacz F używany jest głównie do utwardzania żywic średniocząsteczkowych (E-2, E-3) w podwyższonej temperaturze.

RODZAJE WZMOCNIEŃ

Podstawowym składnikiem nadającym tworzywom wzmocnionym odpowiednie cechy wytrzymałościowe są materiały w postaci włókien. Stwierdzono, że wytrzymałość włókna wzrasta gdy maleje jego średnica (tabl. 3.16). Stworzyło to podstawę do optymalnego wykorzystania własności materiałów wzmacniających kompozyt. Naturalną cechą włókien jest zdolność do przenoszenia wyłącznie naprężeń rozciągających.

Wśród wielu rodzajów włókien największe znaczenie techniczne mają włókna szklane, włókna karbonizowane oraz włókna syntetyczne aramidowe (na przykład Kevlar). Stosuje się także włókna metalowe, jak włókna stalowe, aluminiowe, borowe, wolframowe, monokrystaliczne (wiskersy), oraz włókna naturalne.

Tablica 3.16

Wpływ średnicy na wytrzymałość włókien szklanych

Średnica włókien elementarnych [μm]	Tex	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]
5	5,5	1350
7	11	1150
9	34	1050
13	68	900

Włókna szklane

Włókna szklane występują w postaci rowingu, tkanin i mat. Włókna elementarne dla tych półproduktów są produkowane z następujących rodzajów szkła:

- szkło E; najbardziej popularne włókno szklane do wytwarzania wyrobów z laminatów; jest to szkło bezalkaliczne, glino-boro-krzemowe; wykazuje dobrą odporność na wodę;
- szkło C; charakteryzuje się podwyższoną odpornością chemiczną, zwłaszcza na kwasy;
- szkło M; odznacza się podwyższoną odpornością termiczną oraz wysokim modulem sprężystości dzięki zawartości tlenków berylu i cyrkonu;
- szkło D; ma bardzo małą stratność w obszarze mikrofalowym, dzięki czemu jest stosowane w elektrotechnice;
- szkło R, S; odznacza się wysokimi własnościami wytrzymałościowymi nawet w wysokich temperaturach;
- szkło E-CR; jest to zmodyfikowane włókno typu E, charakteryzujące się podwyższonymi własnościami wytrzymałościowymi i lepszą odpornością na korozję.

Włókna karbonizowane

Włókna karbonizowane otrzymuje się z polimerycznych substratów organicznych w postaci włókien, metodą pirolizy w temperaturze 1000÷2500°C. Rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje włókien: węglowe zawierające (wagowo) 80÷98% węgla i mające w pełni rozwiniętą i mniej zorientowaną strukturę krystaliczną grafitu, oraz grafitowe, zawierające ca 99% węgla o strukturze wyraźnie krystalicznej i silnie zorientowanej, powstałej z włókien węglowych w procesie dodatkowego ich ogrzewania do temperatury powyżej 2500°C. Włókna karbonizowane mają wysokie własności mechaniczne, dużą odporność chemiczną i wysoką stabilność cieplną (tabl. 3.17). Stosuje się je głównie do wytwarzania nowoczesnych konstrukcji kompozytowych ze spoiwami polimerowymi a także metalowymi.

Włókna aramidowe

Włókna aramidowe są wytwarzane z poliamidów aromatycznych. Są produkowane przez koncern Du Pont w dwóch podstawowych odmianach: Nomex i Kevlar. Włókna Nomex charakteryzuje bardzo dobra odporność cieplna oraz bardzo dobre własności elektryczne. Są stosowane przede wszystkim do wytwarzania tkanin specjalnych, filtracyjnych, izolacji cieplnych i elektrycznych oraz do wytwarzania struktur o charakterze plastra miodu w konstrukcjach przekładkowych.

Włókna Kevlar cechuje wysoka wytrzymałość mechaniczna oraz duży moduł sprężystości. Z tego względu są one stosowane jako wzmocnienie wielu plastomerów i elastomerów. Łańcuch polimerów aramidowych zbudowany jest z pierścieni aromatycznych związanych w układzie *para*, rozdzielonych grupami amidowymi. Ich masa cząsteczkowa jest rzędu 40000 przy wy-

jątkowo niskim stopniu polidispersji. Makrocząsteczki odznaczają się dużą sztywnością, a ich średnia długość wynosi 210 nm. Włókna aramidowe zawdzięczają swe cechy specyficznej budowie „prętowej”. „Pręty” są ułożone równolegle do osi włókna. Połączone są wiązaniami wodorowymi. Zespoły makrocząsteczek tworzą podłużne krystality, których długość zależy od masy cząsteczkowej polimeru. Badania wykazują, że we włóknach aramidowych istnieje cienka warstwa zewnętrzna o niewyjaśnionej strukturze oraz stosunkowo gruby rdzeń, który ma budowę warstwową. Grubość koncentrycznie ułożonych warstw wynosi około 200÷300 nm i można przyjąć, że jest taka sama, jak długość krystalitów.

Tablica 3.17

Podstawowe własności włókien karbonizowanych

Własności	Włókna anizotropowe		Włókna izotropowe	
	typ HS (HT)		typ HM	typ P
	przędza			
	filamentowa	multifilamentowa	filamentowa	multifilamentowa
Liczba włókien elementarnych	3000 ÷ 12 000	40 000 ÷ 320 000	3000 ÷ 12 000	20 000 ÷ 30 000
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	3500 ÷ 4000	3200	200 ÷ 2300	900
Moduł sprężystości E [MPa]	235	235	400	40
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	1,6	1,3	0,5	2,3
Gęstość [kg/m ³]	1800			
Wsp. rozszerzalności cieplnej [1/K]	$-0,6 \cdot 10^{-6}$	$-0,6 \cdot 10^{-6}$	$-1 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$
Przewodność cieplna wzdłuż osi włókna [W/(m · K)]	15 ÷ 20	15 ÷ 20	60 ÷ 100	15
Oporność wzdłuż osi włókna [$\mu\Omega \cdot m$]	1,8	1,8	0,8	10

Ponieważ w strukturze występują także krystality dłuższe, wchodzące w skład dwóch lub trzech warstw, sądzi się, że obecność tych krystalitów powoduje wysoką wytrzymałość włókien aramidowych Kevlar 49. Dodatkowe wzmocnienie włókien stanowią poprzeczne wiązania wodorowe między prętowymi makrocząsteczkami poprzez grupy amidowe. We włóknach aramidowych

najbliższe są strefy międzywarstwowe. Włókna aramidowe nie ulegają stopieniu. Obecnie produkowane są trzy typy włókien Kevlar (tabl. 3.18, 3.19):

- Kevlar 27 – włókno przeznaczone specjalnie do wzmocniania gumy, opon, pasów klinowych i transmisyjnych itd.;
- Kevlar 29 – włókno przeznaczone do różnych zastosowań przemysłowych, jak tkaniny i taśmy powlekane, zamienniki włókien azbestowych w wielu różnych wyrobach, tłoczywa, wzmocnione termoplasty itp.;
- Kevlar 49 – włókno o dużym module sprężystości i wytrzymałości, przeznaczone do wyrobu elementów z tworzyw kompozytowych stosowanych w technice lotniczej, raketowej, morskiej i specjalnego sprzętu sportowego. Włókna te cechuje wysoka wytrzymałość właściwa (stosunek wytrzymałości do gęstości), która jest pięciokrotnie wyższa w porównaniu ze stalą, dziesięciokrotnie wyższa niż aluminium i trzykrotnie wyższa w stosunku do włókien szklanych.

Tablica 3.18

Porównanie własności włókien Kevlar z innymi włóknami

Własności	Rodzaj włókna				
	Kevlar 29	Kevlar 49	grafitowe o dużej wytrzymałości	szklane E	azbestowe
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	3620	3620	3150	2450	700 ÷ 2800
Moduł sprężystości przy rozciąganiu [GPa]	58	120	224	73	162,4
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	3,7	1,9	1,25	1,5 ÷ 3,5	0,4 ÷ 1,7
Gęstość [g/cm ³]	1,44	1,45	1,75	2,55	2,5

Tablica 3.19

Porównanie własności tłoczyw epoksydowych z włóknem szklanym i włóknem aramidowym

Własności tłoczywa	Rodzaj włókna	
	Kevlar 49	szklane typu E
Zawartość włókna [% obj.]	50	47
Długość włókna [mm]	12	12
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	1,32	1,86
Gęstość wyprasek [g/cm ³]	200	100
Moduł sprężystości przy rozciąganiu [GPa]	20,7	15,6
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	248	204
Moduł sprężystości przy zginaniu [GPa]	18,7	16,3
Udarność [kJ/m ²]	0,957	1,05

Włókna monokrystaliczne są zaliczane do tzw. trzeciej generacji. Są monokryształami metali, ich tlenków i azotków, węglików krzemu i boru oraz niektórych związków organicznych. Mają wydłużony kształt (stosunek długości do średnicy wynosi co najmniej 10:1) i bardzo małe wymiary (grubość poniżej 1 μm). Ze względu na monokrystaliczną budowę są praktycznie pozbawione wad (właściwych materiałom polikrystalicznym czy amorficznym), takich jak obecność struktur ziarnistych i granic między nimi, próżni, dyslokacji, wady siatki krystalicznej, niejednorodność składu chemicznego w całej objętości, obecność wtrąceń obcych, mikrorys itp. Brak tych wad jest przyczyną wysokich własności wytrzymałościowych, porównywalnych z wytrzymałością wiązań międzyatomowych w sieci kryształu o doskonałej budowie (tabl. 3.20). Wiskersy węgla krzemu β -SiC osiągają w testach badawczych wytrzymałość na rozciąganie ponad 28 GPa, a ich moduł sprężystości wynosi do 700 GPa. Ponieważ ze zmniejszaniem się wymiarów kryształu zmniejsza się liczba występujących wad, stąd wytrzymałość rośnie odwrotnie proporcjonalnie do wymiaru włókna. Wytrzymałość włókien gwałtownie wzrasta, gdy grubość włókien staje się mniejsza niż 2 μm . Wiskersy są wytwarzane w trzech podstawowych formach:

- przędza z włókienek o średnicy 1 ÷ 30 μm , o stosunku średnicy do długości (l/D) jak 500 ÷ 5000:1, o bardzo luźnej strukturze;
- luźne włókna o l/D jak 10 ÷ 200:1;
- pilśni lub włókna warstwowe o l/D 150 ÷ 2500:1.

Ponadto produkowane są specjalne materiały wiskersowe, na przykład włókna polimerowe zawierające wewnątrz zorientowane wiskersy, wiskeryzowane włókna karbonizowane.

Tablica 3.20

Własności różnych włókien monokrystalicznych (wiskersów)

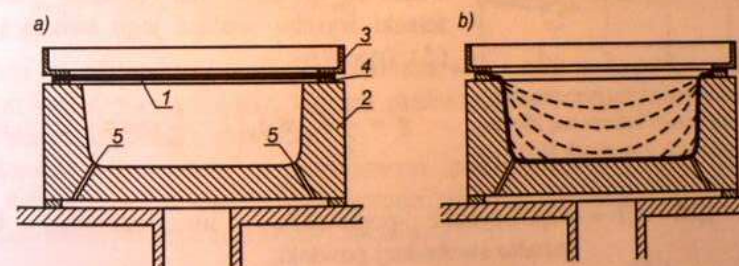
Rodzaj wiskersów	Gęstość [g/cm ³]	Temperatura topnienia [°C]	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	Moduł sprężystości [MPa]
Tlenek glinu	3,9	2080	14 ÷ 28 000	490 ÷ 1050
Azotek glinu	3,3	2200	14 ÷ 21 000	350
Tlenek berylu	1,8	2540	14 ÷ 19 600	700
Węglik boru	2,5	2460	7000	455
Grafit	2,25	3590	21 000	994
Tlenek magnezu	3,6	2800	24 500	315
Węglik krzemu α	3,15	2315	7 ÷ 35 000	490
Węglik krzemu β	3,15	2315	7 ÷ 35 000	560 ÷ 840
Azotek krzemu	3,2	1900	3,5 ÷ 10 500	385

4. METODY WTÓRNEGO PRZETWÓRSTWA TWORZYW

4.1. TERMOFORMOWANIE

Termoformowanie polega na równomiernym nagrzaniu tworzywa termoplastycznego (w postaci płyty lub folii) zamocowanego w ramie napinającej, powyżej temperatury mięknięcia T_m (tworzywa bezpostaciowe) lub temperatury topienia kryształitów T_i (tworzywa częściowo krystaliczne), a następnie na odkształceniu go w formie i utrwaleniu nadanego kształtu przez chłodzenie. W zależności od budowy formy, rozróżnia się dwa zasadnicze rodzaje termoformowania: negatywowe (matrycowe) oraz pozytywowe (stemplowe).

W procesie termoformowania negatywowego tworzywo 1 (rys. 4.1a) umieszcza się na wklęsłej, a więc negatywowej formie 2 i przyciska ramą 3, poprzez uszczelkę gumową 4. Powietrze znajdujące się między tworzywem a powierzchnią formy, po ogrzaniu tworzywa, wysysane jest przez kanały 5, wskutek czego ciśnienie atmosferyczne wciąga materiał do formy (rys. 4.1b). Po upływie czasu, zależnego od grubości warstwy tworzywa, zestala się ono i może być wyjęte z formy w nadanym przez nią kształcie.



Rys. 4.1. Schemat termoformowania negatywowego

Na rys. 4.1b liniami przerywanymi zaznaczono kolejne położenia odkształcanego tworzywa. Początkowo odkształca się ono swobodnie ulegając największemu pocienieniu na wierzchołku powłoki kulistej, po czym po zetknięciu się z powierzchniami bocznymi ($A-B$) oraz dnem matrycy ($D-D$), rozciągana jest część tworzywa znajdująca się pomiędzy miejscami styku ($B-D$) (rys. 4.2). Możliwość stosowania metody negatywowej jest zatem ograniczona malejącą wraz ze wzrostem odkształcenia grubością ścianek w narożach i na krawędziach wyrobu (rys. 4.3).