

TECHNOLOGIA MATERIAŁÓW

Andrzej Modrzyński

Technologia odlewnictwa



Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej

$$\Sigma F_{\min} = F_k \cdot \frac{\mu_k \cdot \sqrt{H_{\text{sr}(k)}}}{\mu_f \cdot \sqrt{H_{\text{sr}(f)}}} \quad (4.14)$$

gdzie:

ΣF_{\min} – najmniejszy sumaryczny przekrój układu wlewowego w formie, cm^2 ,

F_k – powierzchnia przekroju otworu w dnie kadzi, cm^2 ,

$H_{\text{sr}(k)}$ – średnie ciśnienie metalostatyczne w kadzi w procesie zalewania, cm słupa metalu,

$H_{\text{sr}(f)}$ – średnie ciśnienie metalostatyczne w formie w procesie zalewania, cm słupa metalu,

μ_k – współczynnik oporu wypływu metalu z kadzi,

μ_f – współczynnik oporu przepływu metalu w formie (patrz tablica 4.14).

Relacje pomiędzy przekrojami elementów układu wlewowego podczas zalewania z kadzi zatyczkowych powinny spełniać następujące warunki [1, 9, 15]:

- sumaryczny przekrój n wlewów doprowadzających o przekroju F_{WD} wyznacza się z zależności: $nF_{\text{WD}} = 2F_k$ do $3F_k$,
- przekrój wlewu rozdzielającego: $F_{\text{WR}} = n F_{\text{WD}} (n)^{0.5}$,
- przekrój wlewu głównego: $F_{\text{WG}} \geq F_k$.

4.3. Nadlewy i sterowanie procesem zasilania odlewów

W czasie procesu krzepnięcia obserwujemy zmianę objętości metalu wywołaną skurczem stopu, który się składa z trzech charakterystycznych etapów:

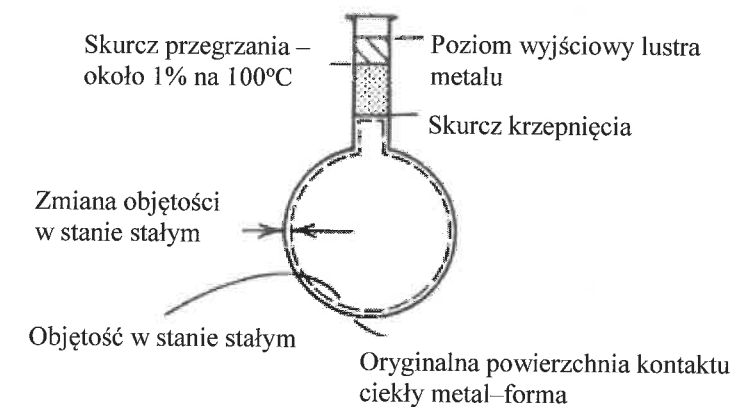
- skurczu w stanie ciekłym ($T_{\text{zalewania}} - T_{\text{likwidus}}$),
- skurczu krzepnięcia ($T_{\text{likwidus}} - T_{\text{solidus}}$),
- skurczu w stanie stałym ($T_{\text{solidus}} - T_{\text{otoczenia}}$).

Znajomość wartości skurczu w stanie stałym (zwanego też skurczem odlewniczym) jest niezbędna do prawidłowej konstrukcji oprzyrządowania odlewniczego (wymiar liniowy modelu musi być powiększony o wartość skurczu liniowego). Znajomość wartości skurczu w stanie ciekłym oraz skurczu krzepnięcia jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania zasilania odlewu przez nadlewy. Poszczególne etapy skurczu przedstawiono graficznie na rys. 4.14.

W przypadku braku nadlewów odlew po krystalizacji i krzepnięciu może wykazywać szereg wad, takich jak:

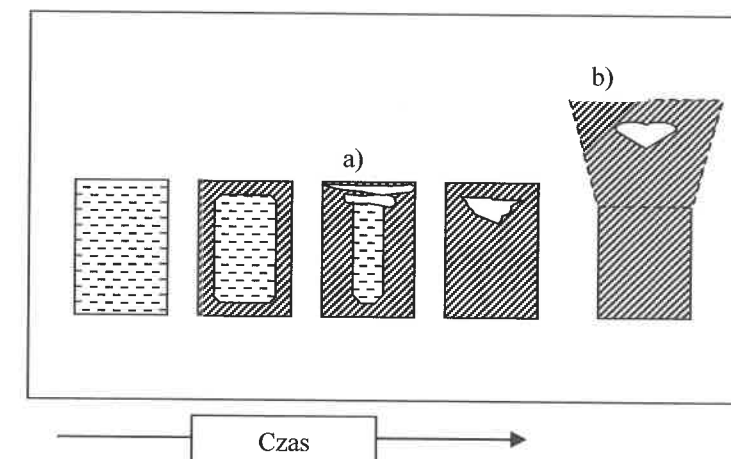
- skupiona jama skurczowa,
- rozproszona jama skurczowa (porowatość skurczowa),
- powierzchniowa deformacja kształtu odlewu,
- nakłucia powierzchniowe.

Nadlew jest specyficzną formą naddatku technologicznego, która ma zapewnić likwidację rzadziny i jam skurczowych w odlewie. Element ten, podobnie jak układ wlewowy, jest oddzielany od odlewu po jego wykonaniu.



Rys. 4.14. Schemat zjawisk skurczowych podczas krzepnięcia metali [17]

Na rys. 4.15 przedstawiono zmiany objętościowe zachodzące w krzepącym odlewie bez zastosowania układu nadlewowego (a) i z zastosowaniem nadlewu (b). Zastosowanie nadlewów chroniących odlew przed wadami pochodzenia skurczowego (jamy skurczowe, rzadziny) w konstrukcji odlewów pociąga za sobą obniżenie uzysku metalu, ale prowadzi do uzyskania odlewów pozbawionych tych wad.



Rys. 4.15. Zmiany objętości odlewu w procesie krzepnięcia: a) zmiany w odlewie krzepącym bez nadlewu, b) zmiany w odlewie krzepącym z nadlewem [3]

Uzysk metalu zalanego do formy odlewniczej (η) wyznaczamy z zależności:

$$\eta = \frac{G_o}{G_o + G_n + G_{uw}} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

gdzie:

G_o – masa odlewu, kg,

G_{uw} – masa układu wlewowego, kg,

G_n – masa nadlewów, kg.

W związku z powyższym szczególnego znaczenia nabiera taki dobór wielkości nadlewu, aby było zapewnione jego efektywne działanie. Można tutaj posługiwać się tzw. współczynnikiem efektywności zasilania odlewów, który można wyznaczyć z zależności:

$$\eta_e = \frac{G'_n - G''_n}{(G_o - G'_n)} \alpha \quad (4.16)$$

gdzie:

η_e – współczynnik efektywności zasilania nadlewu,

G'_n – masa metalu zalanego do nadlewu, kg,

G''_n – masa nadlewu po oddzieleniu go od odlewu, kg,

G_o – masa odlewu, kg,

α – średni współczynnik skurczu metalu do temperatury krzepnięcia, %.

Konieczność stosowania nadlewów jest bezpośrednio związana z koniecznością kompensacji skurczu objętościowego w stanie ciekłym i podczas procesu krzepnięcia odlewu, dla którego nadlew stanowi sztuczny zapas ciekłego metalu na pokrycie zmian objętości stopu.

Wartość skurczu objętościowego dla wybranych stopów (skurcz przegrzania – α_{vc} i skurcz krzepnięcia α_{vk}) przedstawiono w tabeli 4.15, a w tabeli 4.16 podano skurcz krzepnięcia wybranych stopów odlewniczych.

Skurcz objętościowy wybranych stopów [11]

Stop odlewniczy	Skurcz objętościowy, %		
	skurcz w stanie ciekłym, α_{vc}	skurcz krzepnięcia, α_{vk}	razem α ($\alpha_{vc} + \alpha_{vk}$)
Staliwo węglowe	1,50–1,62	3,12–4,08	4,62–5,70
Żeliwo szare			
$CE < 3,8$	–	–	ok. 3,00
$3,8 < CE < 4,1$	–	–	ok. 2,00
$CE > 4,1$	–	–	ok. 1,00
Żeliwo białe	2,00–2,30	3,00–4,60	5,30–6,90
Żeliwo sferoidalne	–	–	6,00–10,00
Znale	2,42–2,46	4,18–4,49	6,29–6,95
Siluminy	1,82–2,86	2,64–6,75	4,46–9,54
Mosiądze	–	–	4,50–6,50
Brązy	–	–	ok. 8,00

Tablica 4.15

Skurcz krzepnięcia dla wybranych stopów odlewniczych [3] Tablica 4.16

Metal / stop	Skurcz krzepnięcia, % obj.
Staliwo węglowe	2,5–3,0
Staliwo węglowe (1% C)	4,0
Żeliwo białe	4,0–4,5
Żeliwo szare	od –1,6 (zmniejszenie objętości) do +2,5 (wzrost objętości)
Żeliwo sferoidalne	od –2,7 (zmniejszenie objętości) do +4,5 (wzrost objętości)
Miedź	4,9
Cu–30Zn	4,5
Cu–10Al	4,0
Aluminium	6,6
Al–4,5Cu	6,3
Al–12Si	3,8
Magnez	4,2
Cynk	6,5

Efektywna praca nadlewu będzie zapewniona tylko wtedy, gdy:

- proces krzepnięcia metalu w nadlewie będzie przebiegał po zakończeniu krzepnięcia w węźle cieplnym odlewu (części odlewu), który on zasila,
- nadmiar metalu w nadlewie będzie zapewniał zasilanie odlewu (węzła cieplnego) w procesie krzepnięcia,
- kształt nadlewu i miejsce jego przyłożenia będą zapewniać stały dopływ ciekłego metalu z nadlewu do odlewu (zasilanego węzła cieplnego),
- rozmiar nadlewu i masa metalu w nadlewie będą dostosowane do minimalnego zapotrzebowania na ciekły metal, umożliwiając jednak uzupełnienie wywołanego zjawiskami skurczowymi ubytku metalu w objętości odlewu (węźle cieplnym).

Podczas projektowania układu nadlewowego należy rozwiązać następujące problemy:

- wyznaczyć miejsca odlewu wymagające zasilania, dzieląc odlew na strefy oddziaływania nadlewów,
- dobrać odpowiednią wielkość nadlewu,
- dobrać sposób połączenia odlewu z nadlewem,
- określić miejsce przyłożenia nadlewu do odlewu,
- określić niezbędną liczbę nadlewów i odpowiedni czas krzepnięcia metalu w nadlewie,
- dobrać rodzaj i typ nadlewu.

4.3.1. Wyznaczanie objętości nadlewu

Do wyznaczania wymiarów nadlewów niezbędnych do zasilania węzłów cieplnych w odlewach stosuje się wiele metod obliczeniowych. Aby nadlew działał skutecznie, proces krzepnięcia stopu w nadlewie powinien następować na końcu, już po zakrzepnięciu metalu w odlewie.

Najczęściej do wyznaczania objętości nadlewu stosuje się metodę modułową opartą na zależności określającej czas krzepnięcia odlewu (lub jego ścianki). Opracował ją Chworinow. Zgodnie z tą regułą czas krzepnięcia odlewu można opisać zależnością:

$$\tau = k^2 \left(\frac{V_o}{F_o}\right)^2 = k^2 M_o^2 \quad (4.17)$$

gdzie:

τ – czas krzepnięcia odlewu, s,

V_o – objętość odlewu, cm^3 ,

F_o – powierzchnia odlewu odprowadzająca ciepło, cm^2 ,

k – współczynnik zależny od rodzaju masy i stopu odlewanego do formy,

M_o – moduł odlewu (węzła cieplnego).

Tę koncepcję rozwinął Włodawer [18] z myślą o praktycznym jej stosowaniu przy obliczaniu wymiarów nadlewów bez konieczności wyznaczania czasu krzepnięcia odlewu. Wprowadził on pojęcie modułu odlewu opisane zależnością:

$$M_o = \frac{V_o}{F_o} \quad (4.18)$$

gdzie:

M_o – moduł odlewu, m,

V_o – objętość odlewu, m^3 ,

F_o – powierzchnia odlewu, m^2 .

Czas krzepnięcia nadlewu i odlewu powinien być proporcjonalny do wartości ich modułów. Jeżeli metal w nadlewie ma zakrzepnąć później niż w odlewie, musi być spełniona zależność:

$$M_N > k M_o \text{ gdzie } k > 1,0$$

Dla odlewów ze staliwa zależność ta przyjmuje postać:

$$M_N = 1,20 M_o$$

Dla innych stopów krzepnących zgodnie z zasadą krzepnięcia kierunkowego (stopy Al i Cu) wartość stosunku M_N/M_o waha się w granicach 1,0–1,2. Dla żeliwa szarego i sferoidalnego w zależności stopnia nasycenia eutektycznego wartość k waha się o odpowiednio 0,8–1,0 oraz 1,0–1,2, ponieważ może wystąpić brak konieczności stosowania nadlewów.

Włodawer [18] wykazał, że wyznaczenie M_o przez podział odlewu na bryły proste jest zabiegiem stosunkowo prostym, co pozwala na pełne wykorzystanie metody modułowej.

Dobierając objętość ciekłego metalu niezbędnego do zasilenia odlewu (części odlewu) o objętości V_o , aby wyeliminować niebezpieczeństwo wystąpienia wad skurczowych, należy dostarczyć w okresie krzepnięcia dodatkowo pewną ilość ciekłego metalu (V_{oz}) z uwzględnieniem współczynnika bezpieczeństwa (zwykle stosuje się jego wartość równą – 1,2), aby wyeliminować zjawiska niekorzystne z punktu widzenia jakości odlewu.

Wartość V_{oz} wyznacza się z zależności:

$$V_{oz} = 1,2 \frac{s}{100} V_o \quad (4.19)$$

gdzie:

V_{oz} – objętość metalu niezbędna do kompensacji zjawisk skurczowych w zakresie od temperatury zalewania do końca krzepnięcia ($s = \alpha_{vc} + \alpha_{vk}$), cm^3 ,

V_o – objętość odlewu (części odlewu – węzła cieplnego), cm^3 ,

1,2 – współczynnik bezpieczeństwa,

s – sumaryczny skurcz przegrzania i krzepnięcia, $s = (\alpha_{vc} + \alpha_{vk})$, %.

W literaturze technicznej można spotkać ten wzór także w nieco innej postaci [1]:

$$V_N = K \frac{X \cdot s}{1 - X \cdot s} \cdot V_o \quad (4.20)$$

gdzie:

V_N – objętość nadlewu dla zasilanej części odlewu, cm^3 ,

K – współczynnik bezpieczeństwa (1,0–1,5) jak w tabelicy 4.17,

s – jak we wzorze (4.19),

V_o – objętość zasilanej części odlewu, cm^3 ,

X – współczynnik ekonomiczności nadlewu (3,0–12,0) definiowany jako stosunek objętości nadlewu do objętości jamy skurczowej (patrz tablica 4.17).

Tablica 4.17

Wartość współczynnika K i X we wzorze (4.20) [1]

Rodzaj nadlewu	K	X
Nadlewy pracujące pod ciśnieniem: mniejszym od atmosferycznego (bez rdzenia lub występu)	1,0	12
atmosferycznym z rdzeniem lub występnem	1,2	7,5–9,0
większym od atmosferycznego	1,3	5,5–7,5
Nadlewy odkryte	1,1	9,0–12,0
Nadlewy termoizolacyjne	1,4	4,0–5,5
Nadlewy egzotermiczne	1,5	3,0–4,0

W pracy [1] podano wartości współczynnika K i współczynnika ekonomiczności nadlewu X w zależności od zastosowanego typu nadlewu.

W końcowym etapie procesu produkcyjnego nadlew jest oddzielany od odlewu i uzyskujemy odlew wolny od wad pochodzenia skurczowego. W krańcowym

przypadku masa nadlewu może być większa od masy odlewu. Wynika to z faktu, że metal z nadlewu musi zasilać odlew przez cały okres procesu krzepnięcia. W praktyce przemysłowej stosuje się szereg rozwiązań technologicznych prowadzących do obniżenia masy nadlewu. Zaliczamy do nich:

- ochładzalniki (zwiększenie szybkości krzepnięcia odlewów),
- nadlewy w otulinach z mas izolacyjnych.

Na rys. 4.16 przedstawiono różne sposoby zasilania kostki sześcienniej przez nadlew prowadzące do zmniejszenia objętości nadlewu i zwiększenia uzysku metalu.

W ostatnich 20 latach, dzięki powszechnemu dostępowi do sprzętu komputerowego, rozwija się intensywnie wykorzystanie metod modelowania matematycznego do analizy:

- doboru konstrukcji odlewów,
- wypełnienia formy ciekłym metalem i procesu krzepnięcia,
- rozkładu naprężeń w odlewach.

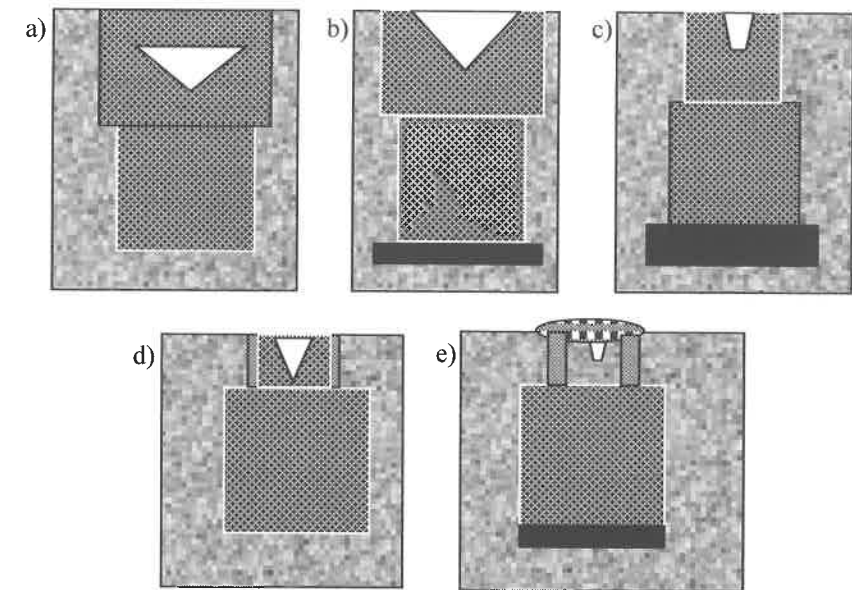
Zagadnienia te wyczerpująco omówiono w monografii pracownika Zakładu Odlewnictwa Instytutu Technologii Materiałów Politechniki Poznańskiej, prof. Z. Ignaszaka [8].

Analiza procesu zasilania odlewów i wydzielanie się gazów z formy do atmosfery są obecnie powszechnie stosowane w przemyśle w celu optymalizacji uzysku metalu, przy jednoczesnej gwarancji uzyskania odlewów wolnych od wad pochodzenia skurczowego i redukcji ciepła oprowadzanego przez nadlew do formy i atmosfery.

Podczas optymalizacji projektowania nadlewów uwzględnia się następujące zabiegi:

- zastosowanie otulin i zasypek izolacyjnych w celu izolacji ścian nadlewu i górnej powierzchni formy,
- pokrycie powierzchni nadlewu masą izolującą ją od kontaktu z atmosferą,
- zastosowanie rdzeni kształtujących „szyjkę” nadlewu w celu ułatwienia oddzielenia nadlewu od odlewu.

Czas pracy zasilacza dzieli się na dwa okresy: uzupełnienie ciekłego metalu w odlewie w trakcie krzepnięcia oraz proces krzepnięcia ciekłego metalu w nadlewie. Dzięki temu, że nadlew zlokalizowano na odlewie, ogranicza się ilość ciepła przepływającego z nadlewu do odlewu. To pozwala poprawić efektywność modułu nadlewu w porównaniu z jego modułem geometrycznym. Zlokalizowanie nadlewu na odlewie przez ograniczenie ilości ciepła przepływającego z nadlewu do odlewu podwyższa efektywny moduł nadlewu w porównaniu z jego modułem geometrycznym. Wydajność zasilająca modułu nadlewu w otulinie izolacyjnej różni się zasadniczo w porównaniu z nadlewem bez izolacji (jest większa) i w tym przypadku można stosować nadlew o mniejszym module. Wskutek tego mniejsza ilość ciekłego metalu jest niezbędna do uzyskania odlewu bez wad pochodzenia skurczowego i zostają zredukowane koszty wytworzenia odlewu.

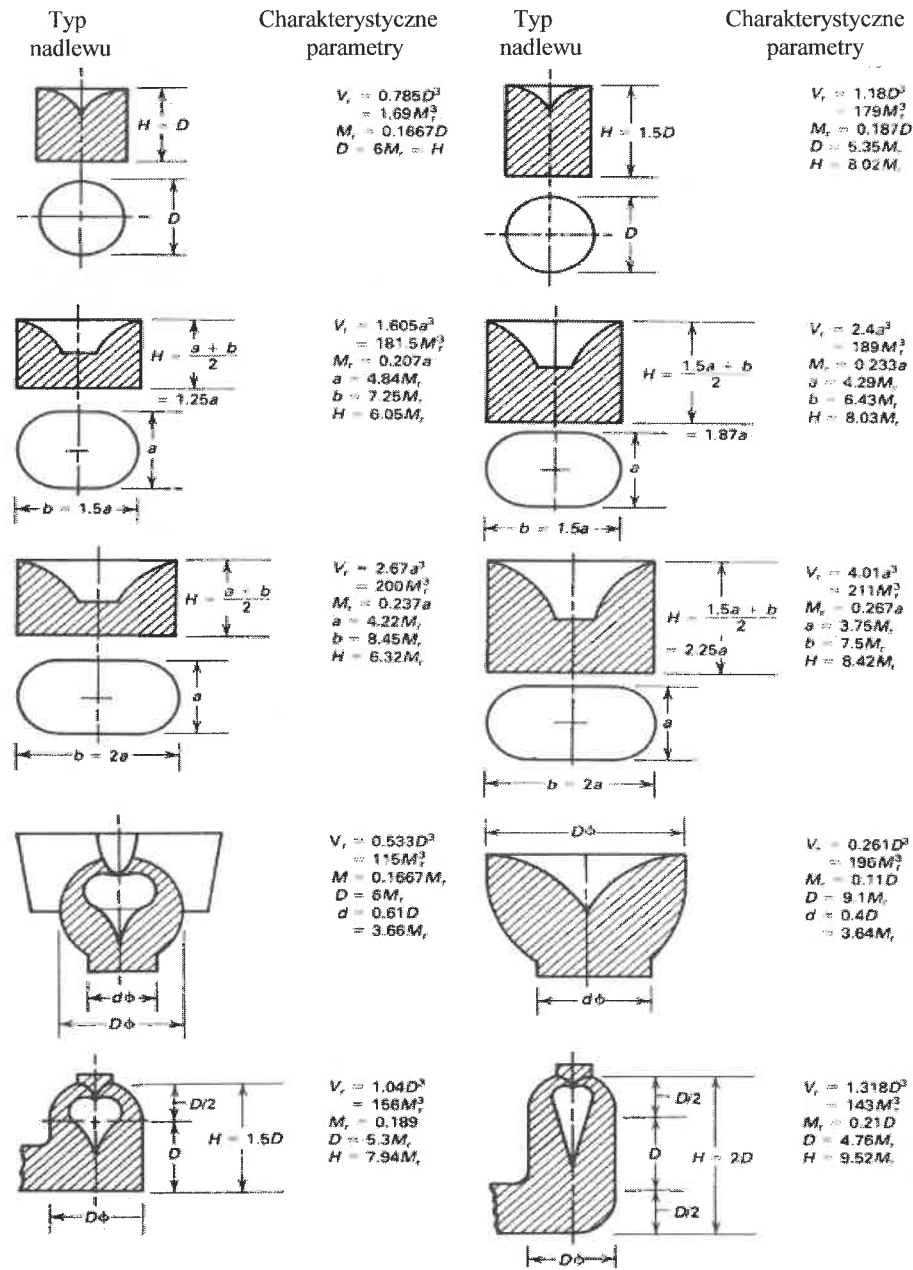


Rys. 4.16. Różne metody zasilania kostki sześcienniej poprzez nadlewy: a) nadlew otwarty, b) ochładzalnik + nadlew otwarty, c) mały nadlew otwarty z ochładzalnikiem, d) nadlew w otulinie izolacyjnej, e) nadlew w otulinie izolacyjnej + zasypka izolacyjna + ochładzalnik (oprac. na podst. [17])

Skuteczność izolacji termicznej ścian nadlewu oraz zasypki izolującej na powierzchni ciekłego metalu w nadlewie porównano w tablicy 4.18.

W tablicy 4.18 podano także oszacowane straty ciepła oddawanego przez promieniowanie z górnej powierzchni podczas krystalizacji nadlewu. Z tych danych wynika, że należy zwrócić szczególną uwagę na ochronę górnej swobodnej powierzchni nadlewu przed stratami ciepła przez promieniowanie (szczególnie podczas wykonywania odlewów ze staliwa).

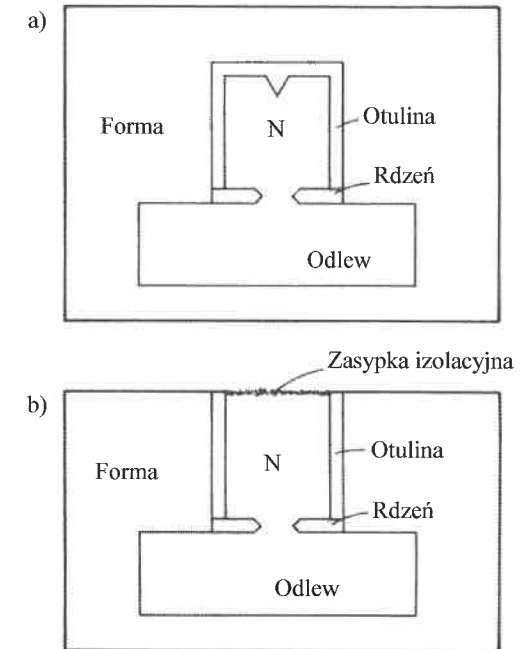
Cały proces krzepnięcia metalu w nadlewie można podzielić na: utworzenie warstwy stałego metalu na powierzchni kontaktu metal–forma oraz proces zasilania. Zasilanie odlewu ciekłym metalem poprzez nadlew, z zastosowaniem masy izolacyjnej i ograniczeniem ilości ciepła odprowadzanego z nadlewu do odlewu, pozwala na zwiększenie efektywności działania nadlewu w porównaniu z jego obliczeniowym modułem (rys. 4.18a). W związku z tym potrzeba mniej ciekłego metalu, w porównaniu z nadlewem nieizolowanym cieplnie (możliwość zastosowania mniejszego modułu), do uzyskania odlewu bez wad. Zmniejszenie wymiarów nadlewu pozwala zastosować formy o mniejszych wymiarach i wyprodukować więcej form z tej samej ilości masy formierskiej przy mniejszym rozchodzie ciekłego metalu.



Rys. 4.17. Kształt typowych nadlewów i ich charakterystyczne parametry (gdzie: V_r – objętość nadlewu, M_r – moduł nadlewu, H – wysokość elementów, D i d – średnica elementów) [17]

Tablica 4.18 Skuteczność izolacji termicznej ścian nadlewu i jego powierzchni swobodnej dla nadlewu o średnicy 102 mm i wysokości 102 mm (oprac. na podst. [17])

Stop, z którego jest wykonywany odlew	Straty ciepła przez promieniowanie, %	Czas krzepnięcia nadlewu, s			
		Typ nadlewu			
		nadlew otwarty odformowany w masie	nadlew otwarty w otulinie izolacyjnej	nadlew otwarty z powierzchnią pokrytą zasypką izolacyjną	nadlew otwarty w otulinie izolacyjnej z powierzchnią pokrytą izolacyjną zasypką
Staliwo węglowe	42	5,0	7,5	13,4	43,0
Miedź	26	8,2	15,1	14,0	45,0
Aluminium	8	12,3	31,1	14,3	45,6



Rys. 4.18. Forma odlewnicza z nadlewem: a) w otulinie, b) w otulinie z zastosowaniem zasypki egzotermicznej [3]

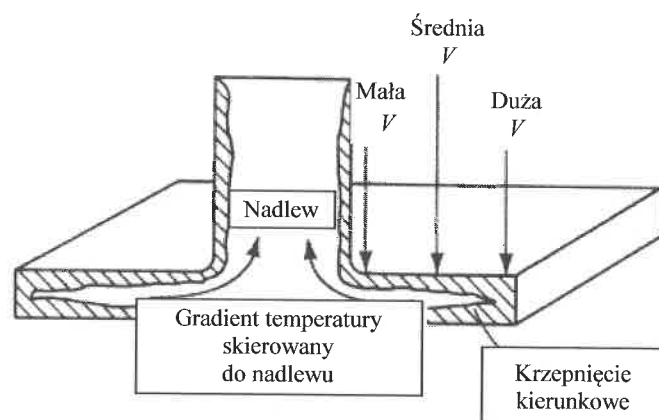
Na rys. 4.17 podano kształt typowych nadlewów oraz ich charakterystyczne parametry, a na rysunku 4.19 rozkład prędkości krzepnięcia ciekłego metalu w nadlewie przy prawidłowej lokalizacji nadlewu na odlewie o kształcie płyty.

4.2.3. Miejsce przyłożenia nadlewu

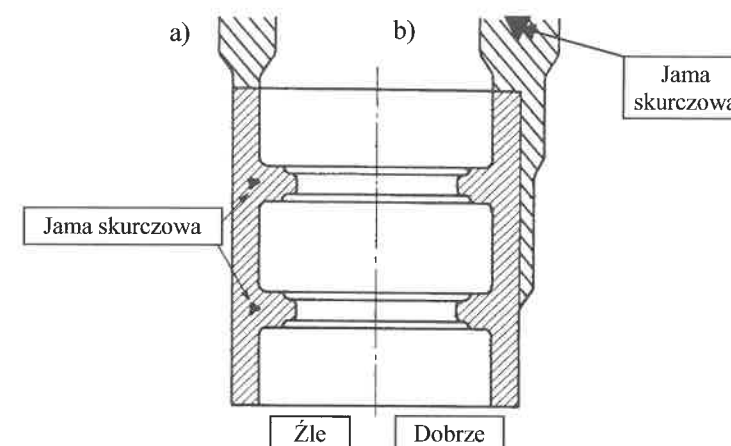
W przypadku znacznej sumarycznej wartości skurczu objętościowego przegrzania i krzepnięcia, aby uniknąć powstania w odlewie jamy skurczowej, należy wytworzyć takie warunki, żeby krzepnięcie odlewu przebiegało według zasady krzepnięcia kierunkowego. Zgodnie z tą zasadą obserwujemy narastanie fazy stałej od stref, w których jest generowany najwyższy gradient temperatury. Fragmenty odlewu krzepnące na końcu są zasilane przez nadlew. Ponieważ metal w nadlewie do końca procesu krzepnięcia pozostaje w stanie ciekłym, to właśnie w nadlewie lokalizuje się jama skurczowa (patrz rys. 4.15). Zwykle takie usytuowanie odlewu w formie jest niemożliwe. Aby umożliwić zastosowanie zasady krzepnięcia kierunkowego technolog bardzo często wprowadza do kształtu odlewu naddatki technologiczne. Zgodnie z tą zasadą odlew krzepnie od najcieńszej do najgrubszej (z najmniejszą szybkością odprowadzania ciepła) ścianki, na której przykłada się nadlew. Na rys. 4.20 pokazano zmianę kształtu odlewu w formie w celu umożliwienia krzepnięcia kierunkowego.

Podczas lokalizacji nadlewu należy wykorzystać dodatkowe oddziaływanie siły grawitacji prowadzącej do ciągłego uzupełniania ubytków ciekłego metalu (stopu) w odlewie w procesie krzepnięcia. W tym celu umieszcza się masywne fragmenty odlewu skierowane ku górze i lokalizuje na ich powierzchniach nadlew (nadlewy).

Rozkład prędkości krzepnięcia ciekłego metalu w prawidłowo dobranym i zlokalizowanym nadlewie



Rys. 4.19. Przebieg procesu krzepnięcia ciekłego metalu w prawidłowo dobranym i zlokalizowanym nadlewie [17]



Rys. 4.20. Zmiana kształtu odlewu w formie w celu zapewnienia krzepnięcia kierunkowego: a) przed zmianą, b) po zmianie [5]

Prędkość odprowadzania ciepła z odlewu można regulować sztucznie, ochładzając wybrane fragmenty odlewu przez zamontowanie w formie lub rdzeniach wkładek metalowych (tzw. ochładzalników – kokili). Taki element metalowy zainstalowany w formie może w sposób istotny zwiększyć prędkość odprowadzenia ciepła, dzięki znacznie większej przewodności cieplnej wkładki metalowej w porównaniu do przewodności cieplnej materiału formy. Ochładzalniki zwykle umieszcza się przy niewielkich zgrubieniach w odlewie (stanowiących tzw. lokalne węzły cieplne). Podstawowym celem tego działania jest zrównanie szybkości krzepnięcia tego fragmentu odlewu z sąsiednimi fragmentami odlewu, dzięki czemu jest możliwe skuteczne dostarczenie ciekłego metalu z wyżej położonych fragmentów odlewu i nadlewu do fragmentu odlewu poniżej węzła cieplnego.

W przebiegu procesu krzepnięcia ciekłego metalu w formie bardzo ważną rolę odgrywa miejsce przyłożenia wlewu (wlewów), które doprowadzają ciekły metal do wnętrza formy. Wynika to z tego, że temperatura ciekłego metalu we wlewie doprowadzającym jest najwyższa. Aby doprowadzić do krzepnięcia kierunkowego, najkorzystniej będzie doprowadzić ciekły metal do nadlewu lub w jego sąsiedztwo. W tabelicy 4.19 podano zasady wyznaczania wymiarów odkrytego nadlewu walcowego dla zasilania płyty o grubości g . Moduł odlewu płyty o grubości g wynosi:

$$M_o = \frac{V}{F} = \frac{g \cdot l \cdot h}{2g \cdot l \cdot h} = \frac{g l h}{2g l h} = \frac{g}{2} \quad (4.21)$$

gdzie:

M_o – moduł odlewu płyty,

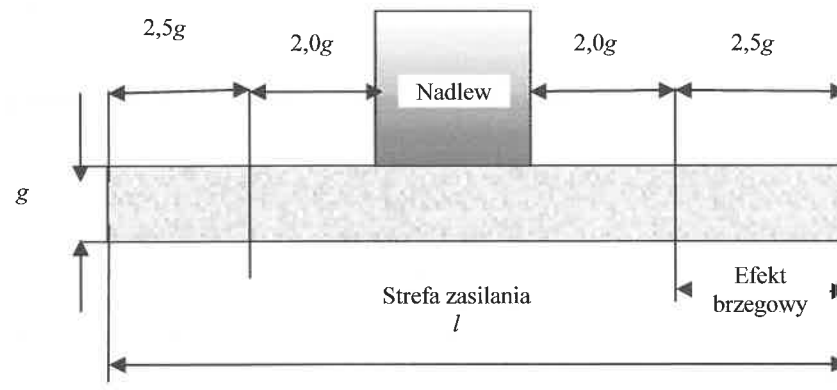
g – grubość płyty,

h – szerokość płyty,
 l – długość płyty.

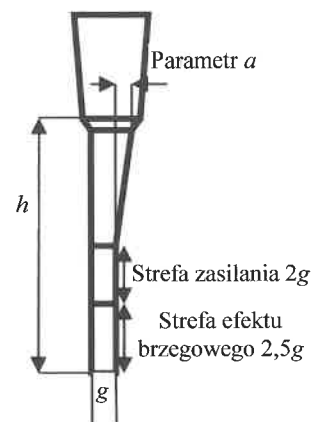
Schemat rozpatrywanego przypadku dla odlewu płyty ze staliwa węglowego (0,2–0,3% C) przedstawiono na rys. 4.21.

W przypadku płyty przedstawionej na rys. 4.22 odlewanej w pozycji pionowej, w celu zapobieżenia wystąpieniu porowatości w odlewie, od punktu zasięgu sumarycznego efektu brzegowego i strefy zasilania nadlewu ($2,5g + 2g = 4,5g$) grubość odlewanej płyty powinna wzrastać o wartość parametru a (patrz rys. 4.22). Na rys. 4.23 przedstawiono zależność parametru a od wysokości i grubości płyty.

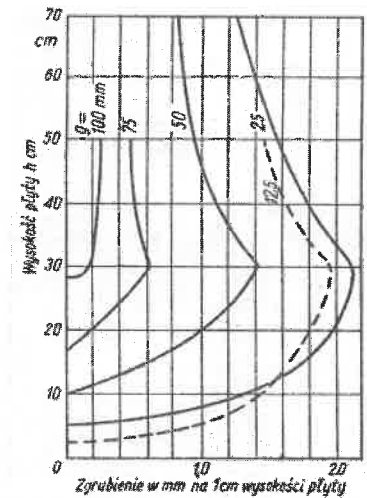
W tabelicy 4.19 podano uproszczone zasady obliczania nadlewu w kształcie walca dla wybranych stopów odlewniczych. Przykłady lokalizacji nadlewu na belce o przekroju ($b = g$) zaprezentowano na rysunku 4.24.



Rys. 4.21. Zasilanie odlewu płyty ze staliwa węglowego (0,2–0,3% C)



Rys. 4.22. Ukształtowanie płyty odlewanej pionowo (dobór parametru a) [15, 16]



Rys. 4.23. Nomogram doboru wartości parametru a w funkcji grubości płyty g i jej wysokości h [15, 16]

Tablica 4.19

Zasady obliczania nadlewów walcowych (o średnicy D i wysokości H) dla wybranych stopów odlewniczych [15, 16]

Rodzaj stopu	Wartość modułu nadlewu M_N	Wysokość nadlewu, H	Zasięg działania nadlewu L_N	Kształt nadlewu ($\Phi D = H$)
Żeliwo sferoidalne	$M_N = 1,2M_0$	$H = 1,5D$	$4M_N + E_B$	
Staliwo	$M_N = 1,2M_0$	$H = (1-1,5)D$	dla $M_N \leq 8 \text{ mm}$ $L_N = 5M_N + E_B$ dla $8 \text{ mm} \geq M_N \geq 13 \text{ mm}$ $L_N = 4M_N + E_B$ dla $M_N \geq 13 \text{ mm}$ $L_N = 3M_N + E_B$	
Stopy Al	$M_N = 1,5M_0$	$H = 2,0D$	Zależny od typu ochładzalnika	

Moduł odlewu (zasilanego węzła cieplnego)

$$M_0 = V_0 / F_0$$

gdzie:

V_0 – objętość odlewu (zasilanego węzła cieplnego),

F_0 – pole powierzchni odprowadzającej ciepło z odlewu (z zasilanego węzła),

D – średnica nadlewu (walcowy)

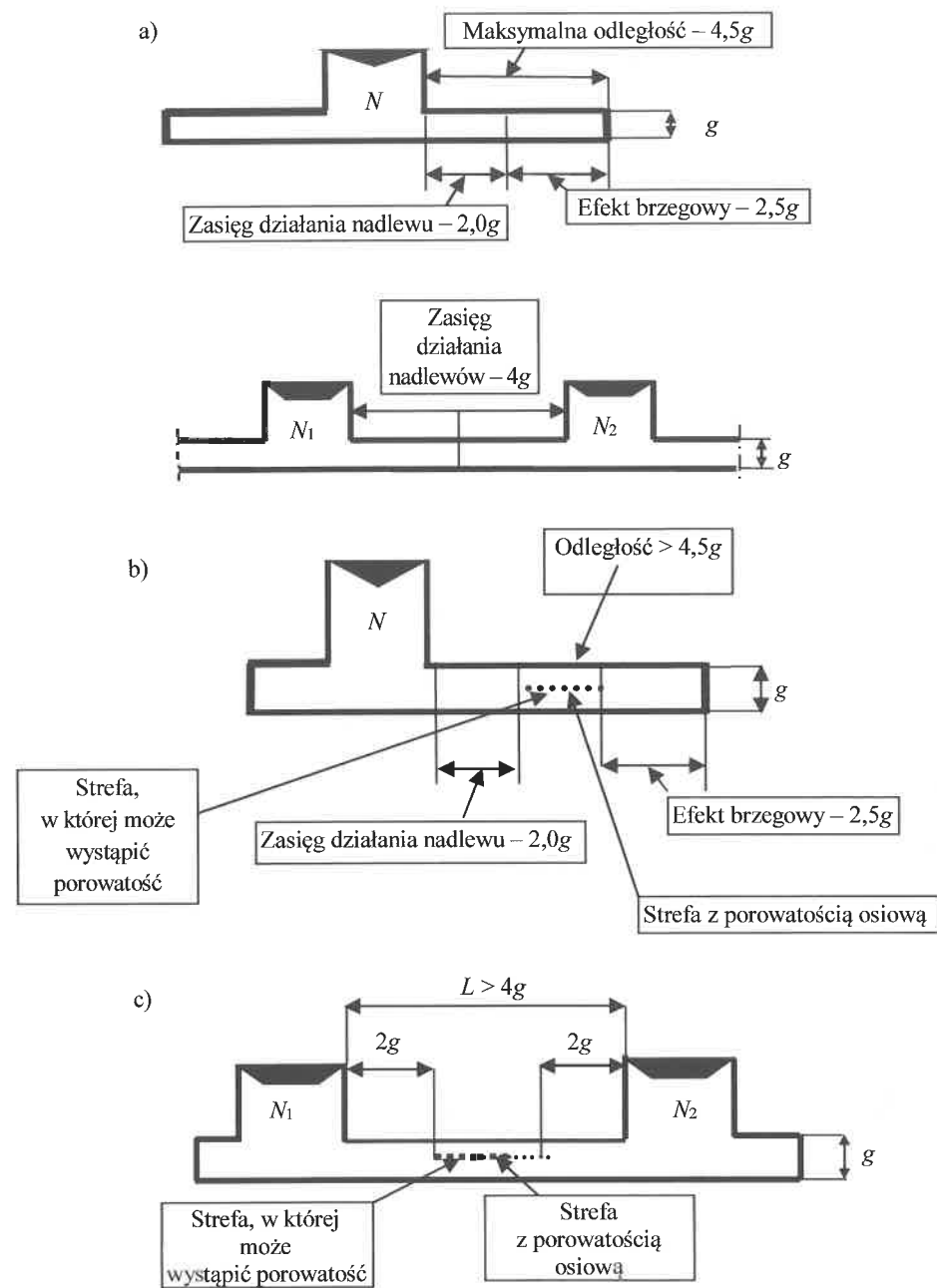
H – wysokość nadlewu (walcowy o średnicy podstawy D)

g – grubość ścianki odlewu,

M_N – moduł nadlewu

Uwaga:

E_B – efekt brzegowy ($E_B = 2,5g$)



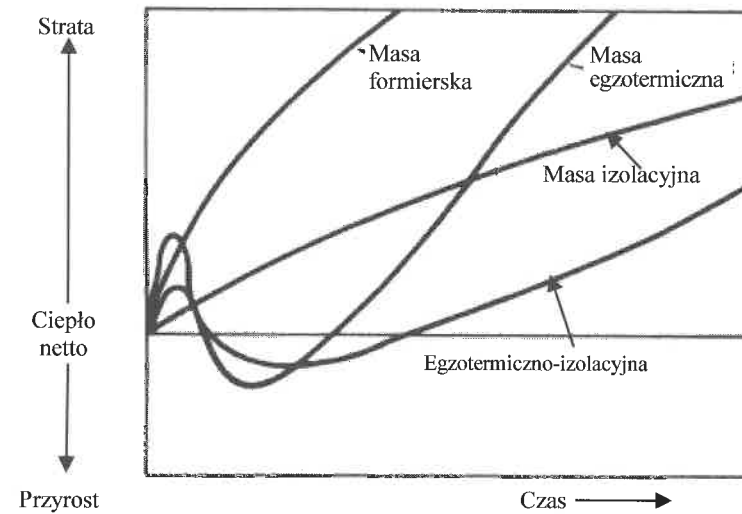
Rys. 4.24. Długości strefy zasilania dla nadlewu umiejscowionego przy końcu płyty stalowej (szerokość płyty $> 5g$) oraz między nadlewami umieszczonymi na płycie (szerokość płyty $> 5g$): a) właściwa lokalizacja, b i c) niewłaściwa lokalizacja [17]

4.3.3. Właściwości termofizyczne mas stosowanych do sporządzania otulin nadlewów

Masy stosowane do sporządzania otulin nadlewów i przepon ułatwiających oddzielenie nadlewów od odlewów można podzielić na:

- egzotermiczne,
- izolacyjne,
- egzotermiczno-izolacyjne.

Graficznie tę klasyfikację, w porównaniu z klasyczną masą formierską, przedstawiono na rys. 4.25.



Rys. 4.25. Straty ciepła z nadlewu jako funkcja czasu i rodzaju materiału zastosowanego do sporządzenia otuliny [17]

Otuliny egzotermiczne wytwarza się z proszku aluminium, które utlenia się, wydzielając ciepło. Charakteryzują się one dużą gęstością, a ich osnowa po reakcji egzotermicznej ma podobne właściwości cieplne jak masa formierska. Masy tego typu wykazują w pierwszym momencie kontaktu z ciekłym metalem efekt chłodzący, a następnie silny efekt egzotermiczny zdolny nawet roztopić ciekły metal, który już osiągnął temperaturę solidus. Są one stosowane do sporządzania otulin dla małych i średniej wielkości nadlewów. Nie są zalecane dla dużych nadlewów charakteryzujących się długim czasem krystalizacji. Materiały tego typu mogą być także źródłem zanieczyszczeń występujących w stopie. Główne składniki występujące w tych masach są podobne do tych stosowanych w masach do reakcji termitowej. Metal powstały w wyniku przebiegu reakcji termitowej nie powinien być wykorzystany do zasilania odlewu.

Otuliny izolacyjne sporządza się na osnowie z rozdrobnionych materiałów ogniotrwałych o małej gęstości. Wykazują one w pierwszym momencie małą zdolność chłodzącą w stosunku do ciekłego metalu i dzięki małej gęstości ograniczają ilość ciepła odprowadzanego z nadlewu. Są chętnie stosowane do małych i średnich nadlewów i stopów wykazujących niską temperaturę zalewania. Nie są zalecane do dużych nadlewów, ponieważ te materiały o małej gęstości podlegają termicznej degradacji podczas długiego oddziaływania na nie wysokiego ciśnienia i temperatury. Mogą być także źródłem zanieczyszczeń niemetalicznych w odlewach.

Materiały izolacyjno-egzotermiczne są zbudowane z materiałów egzotermicznych otoczonych przez materiały ogniotrwałe o wysokiej ognioodporności. Ta grupa materiałów jest bardzo uniwersalna – ma niską początkową zdolność chłodzącą, następujący po tym efekt egzotermiczny dzięki przebiegowi reakcji chemicznej oraz dobre właściwości izolacyjne po zakończeniu tej reakcji. Znajdują one zastosowanie do sporządzania szerokiego typoszeregu wymiarowego nadlewów. Zdolność tych materiałów do wytwarzania wtrąceń niemetalicznych zanieczyszczających wytwarzane odlewy lokuje się między otulinami izolacyjnymi i egzotermicznymi.

W projektowaniu zasilania odlewów przez nadlewy należy dążyć do ograniczenia zanieczyszczenia odlewu wtrąceniami. W zależności od typu zastosowanego układu nadlewowego pewne pierwiastki mogą być absorbowane przez metal znajdujący się w nadlewie. Do tych pierwiastków można zaliczyć węgiel, krzem, aluminium, tlen, azot oraz siarkę. Powszechne stosowanie nadlewów pozwala stwierdzić, że powstawanie wtrąceń niemetalicznych w nadlewie, nie stwarza zwykle problemów w uzyskaniu odlewów dobrej jakości. Jednak służby technologiczne powinny takie niebezpieczeństwo ciągle monitorować.

4.3.4. Czynniki wpływające na dobór wymiarów nadlewu

Właściwości termofizyczne układów zasilania odlewów można szybko określić przez wyznaczenie modułu nadlewu według wcześniej przedstawionej metodyki. Wymiary najbardziej popularnych nadlewów cylindrycznych mogą być łatwo wyznaczone, ponieważ moduł cylindrycznego nadlewu jest dany przez wyrażenie:

$$M_N = \frac{V_N}{F_N} = \frac{\pi R^2 H}{2\pi R H + \pi R^2} = \frac{RH}{2H + R} = \frac{DH}{4H + D} \quad (4.22)$$

gdzie:

- M_N – moduł nadlewu,
- R, D – promień i średnica nadlewu,
- H – wysokość nadlewu,
- V_N – objętość nadlewu,
- F_N – powierzchnia nadlewu odprowadzająca ciepło.

Izolacja nadlewu w otulinie i zastosowanie zasyпки izolacyjnej pozwalają na efektywne obniżenie powierzchni nadlewu. Wpływ zastosowania otuliny izolacyjnej może być określony przez współczynnik X , a wpływ zasyпки izolacyjnej współczynnikiem Y (w stosunku do formy piaskowej dla której $X = 1$). Współczynniki X i Y są nazywane jawnymi współczynnikami przetwarzania powierzchni pozornej (ASFA). Wartość efektywnego modułu cylindrycznego nadlewu M_N zarówno dla ścian bocznych, jak i górnej powierzchni można wyrazić zależnością (4.23):

$$M_N = \frac{DH}{4HX + DY} \quad (4.23)$$

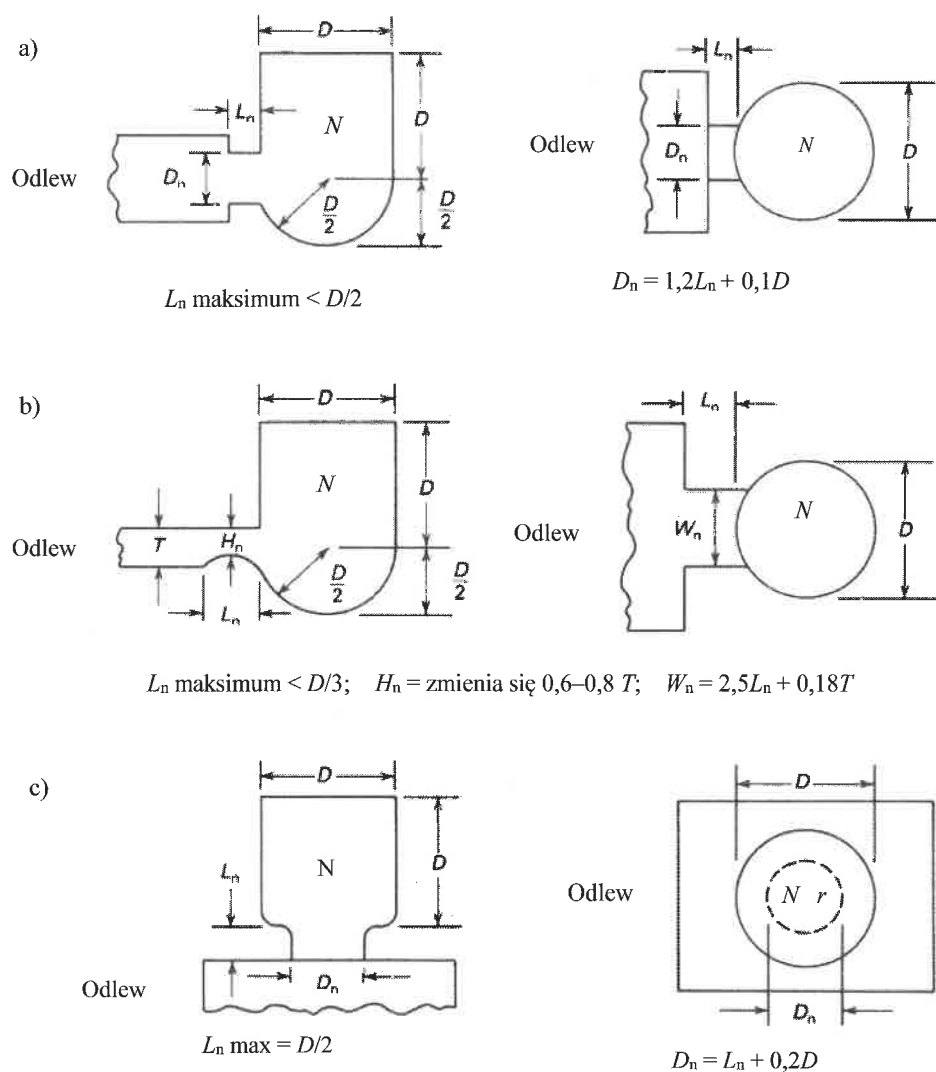
Wartości współczynników ASFA (X i Y) dla otulin izolacyjnych i egzotermicznych wahają się w granicach 0,5–0,9. Im mniejsza wartość współczynnika, tym większy efekt izolujący. Kiedy $X = 0,65$ oraz $Y = 0,70$, dla cylindrycznego nadlewu o wysokości równej średnicy ($H = D$) uzyskamy:

$$M_N = \frac{D^2}{4 \cdot D \cdot 0,65 + D \cdot 0,70} = \frac{D^2}{3,3D} = 0,303D \quad (4.24)$$

Dla cylindrycznego nadlewu, dla którego $H = D$, odwzorowanego w masie formierskiej z nieizolowaną górną powierzchnią moduł ten wynosi $M_N = 0,2D$. Wartości współczynników X i Y są dostępne dla technologów w zakładach odlewniczych oraz w bazach danych programów komputerowych wspomagających projektowanie procesów odlewniczych.

4.3.5. Rdzenie stosowane do odwzorowania połączenia odlewu z nadlewu (szyjki nadlewu)

Aby krzepnięcie przebiegało kierunkowo – od odlewu do nadlewu – moduł szyjki nadlewu M_{sz} powinien mieć wartość średnią wynikającą z dodania modułu odlewu M_o i nadlewu M_N . Zgodnie z regułą przedstawioną powyżej dla odlewów ze staliwa $M_N = 1,2M_o$. W związku z tym dla doboru modułu szyjki nadlewu obowiązuje generalna zasada $M_n = 1,1M_{sz}$. Należy jeszcze raz podkreślić, że żeliwo szare jest wyjątkowym tworzywem odlewniczym. Ekspansja grafitu między temperaturami likwidus a solidus likwiduje konieczność pozostawienia pełnej drożności szyjki w celu zapewnienia komunikacji między nadlewu i odlewem przez cały czas krzepnięcia odlewu. W zależności od składu chemicznego ciekłego metalu szyjka nadlewu podczas wykonywania odlewów z żeliwa szarego i sferoidalnego powinna mieć moduł w granicach M_{sz} wynoszący 0,67–1,20 M_o . Ogólne zasady doboru parametrów szyjki nadlewu dla stopów żelaza są powszechnie dostępne (patrz rys. 4.26). Przykładowy sposób wykorzystania szyjki do ułatwienia procesu oddzielenia nadlewu od odlewu zaprezentowano na rys. 4.18.



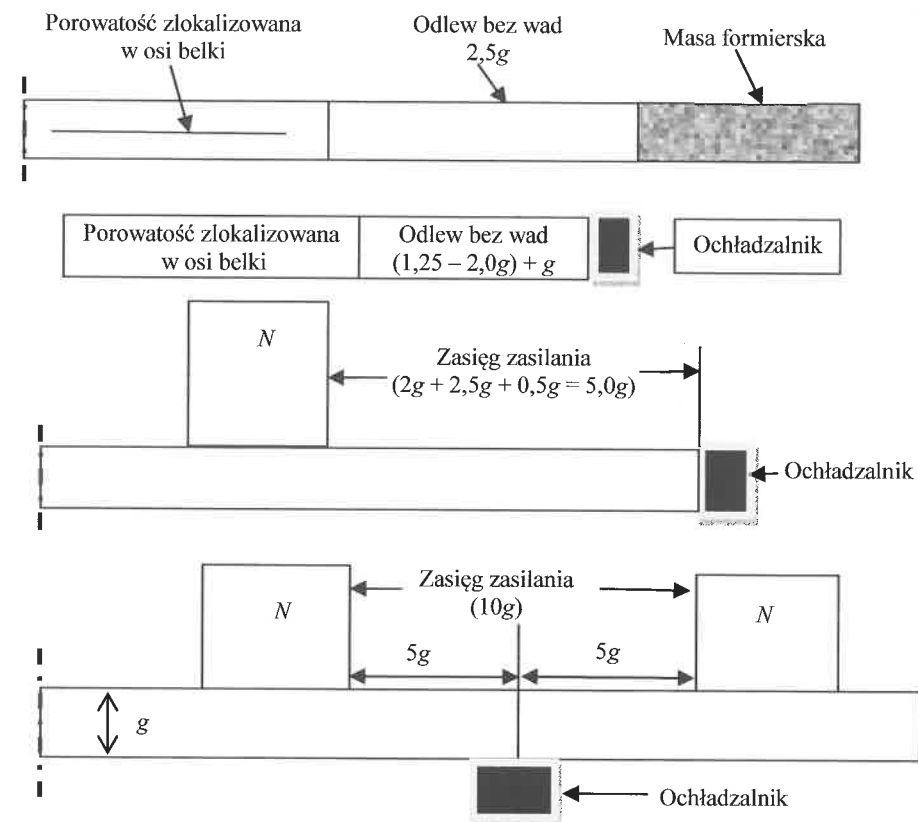
Rys. 4.26. Ogólne zasady doboru wymiarów szyjki nadlewów dla odlewów ze stopów żelaza (N – oznaczenie nadlewu): a) typowy kształt nadlewu bocznego, b) nadlew boczny stosowany podczas odlewania płyt, c) górny nadlew odkryty [17]

Rdzenie odzwierciedlające kształt szyjki są wykonywane z mas rdzeniowych lub kształt szyjki jest odzwierciedlany przez wkładki ceramiczne. Grubość szyjki wynosi zwykle ok. 10% wymiaru nadlewu, a szerokość otworu w szyjce zwykle waha się w granicach 40–50% średnicy nadlewu.

Dzięki zastosowaniu wkładek rdzeniowych o mniejszej masie szybciej uzyskują one temperaturę zbliżoną do temperatury otaczającego je ciekłego metalu, więc mają nieznaczny wpływ na proces krzepnięcia nadlewu. Zastosowanie odpowiedniego typu nadlewu do konkretnego odlewu stwarza pewne problemy natury technologicznej. W niektórych sytuacjach trudno jest dobrać właściwy rozmiar i kształt nadlewu oraz szyjki ze względu na złożoną konfigurację odlewu. Należy także pamiętać o procedurze oddzielenia nadlewu od odlewu przez odcięcie.

4.4. Ochładzalniki

Wykonywanie odlewów o zróżnicowanej grubości ścianki jest bardzo częstym przypadkiem w praktyce odlewniczej. Wtedy proces krzepnięcia rozpoczyna się od najcieńszych ścianek odlewu i następuje odcięcie ich kontaktu z grub-



Rys. 4.27. Wpływ ochładzalnika na rozszerzenie strefy zasilania nadlewów umieszczonych na odlewie płyty stalowej (szerokość płyty $> g$)