ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1975

Seria: Mechanika z. 54 Nr kol. 438

Józef Gawroński, Bernard Krajczy

Instytut Odlewnictwa Politechniki Śląskiej

OPTYMALIZACJA NIEKTÓRYCH PARAMETRÓW ODLEWANIA KOKILOWEGO ŻELIWA SFEROIDALNEGO

Streszczenie: Przeprowadzono analizę i dobrano najkorzystniejsze warunki odlewania kokilowego, zapewniające małą intensywność stygnięcia odlewu w kokili ($Bi_1 = 0,1$). Uzyskane wyniki badań stanowią podstawę do opracowania matematycznych zależności pomiędzy podstawowymi własnościami mechanicznymi (HB, R_m, A_5) a zawartością węgla krzemu i manganu w żeliwie oraz grubością ścianki odlewu kokilowego.

Wprowadzenie

Podstawowe znaczenie dla szerokiego wprowadzenia odlewnictwa kokilowego posiada takie zaprojektowanie procesu technologicznego, aby odlew krzepł z założoną szybkością, zapewniającą uzyskanie przy danym składzie chemicznym żądanej struktury i własności mechanicznych żeliwa, a jednocześnie temperatura kokili żeliwnej nie przekraczała 600°C przy jak najmniejszym spadku temperatury na przekroje jej ścianki. Scharakteryzowany przebieg procesu technologicznego można zaprogramować, jeżeli znane są analityczne zależności pozwalające na ilościową ocenę wpływu różnych parametrów na proces krzepnięcia i stygnięcia odlewu oraz na proces nagrzewania i stygnięcia kokili [1, 2].

Zwiększona intensywność stygnięcia odlewu w kokili i związany z tym wzrost skłonności do zabielenia odlewów z żeliwa sferoidalnego, stwarzają konieczność przeciwdziałania temu zjawisku, zarówno przez odpowiedni dobór składu chemicznego żeliwa jak i stworzenie takich warunków termofizycznych układu odlew - forma, aby intensywność stygnięcia odlewu była bardzo mała ($Bi_1 \ll 1$).

Jest to szczególnie ważne dla odlewów cienkościennych, gdzie proces krystalizacji jest w głównej mierze zdeterminowany strukturą zakrzepniętej warstewki zewnętrznej odlewu.

Zagadnienie wpływu składu chemicznego na własności mechaniczne żeliwa sferoidalnego w określonych warunkach stygnięcia odlewu stanowi cel niniejszej pracy.

Zakres i metodyka badań

Uzyskanie wysokiej jakości żeliwa sferoidalnego, jak wykazała praktyka odlewnicza, wymaga zarówno ograniczenia zawartości fosforu i siarki odpowiednio do 0,08 i 0,02% jak i stosowania minimalnego, koniecznego do uzyskania grafitu sferoidalnego dodatku magnezu. Uwzględniając te założenia, ustalono w oparciu o dane literaturowe oraz badania własne [3] następujący zakres zmian składu chemicznego żeliwa sferoidalnego:

$$3,4 \div 3,8\%C; \quad 2,2 \div 3,4\%Si; \quad 0,3 \div 0,7\%Mn.$$

Przyjęty w badaniach zakres zmian grubości ścianki odlewu, X_1 = 5 do 30 mm, obejmuje najczęściej występujące w praktyce grubości ścianek.

Rozwiązaniem matematycznym zagadnienia wpływu składu chemicznego w powiązaniu z grubością ścianki odlewu na własności mechaniczne kokilowych odlewów z żeliwa sferoidalnego jest znalezienie następujących funkcji odpowiedzi:

$$(HB, R_m, A_5) = f(\%C, \%Si, \%Mn, X_1)$$

W badaniach posłużono się metodą całkowitego doświadczenia czynnikowego typu 2^4 pozwalającą przy ograniczonej ilości prób na wyznaczenie współczynników regresji z minimalną wariancją [4].

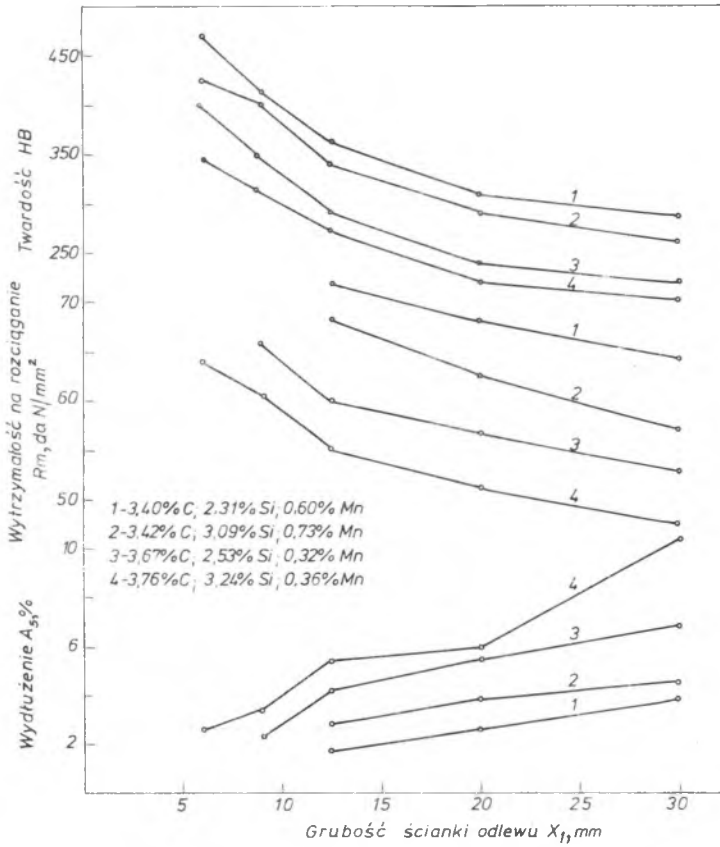
Warunki przeprowadzonych badań

W badaniach użyto kokil grubościennych, zapewniających uzyskanie odlewów walcowych o średnicy 12, 16, 25, 40 i 60 mm. Grubość ścianki kokili X_2 wyrażona jest stosunkiem $\frac{X_2}{X_1} = 2$, a grubość ścianki odlewu X_1 równa jest jego promieniowi.

Zgodnie z przyjętym kryterium małej intensywności stygnięcia dla odlewu o średnicy 12 mm i Bi_1 = 0,1 wyznaczono podstawowe parametry odlewania kokilowego. Temperatura początkowa kokil wahała się w granicach 380÷410°C Jako pokrycie ochronne zastosowano pokrycie na bazie talku (20% talku, 3% szkła wodnego) o współczynniku przewodzenia ciepła λ_p = 0,21 W/m deg. Grubość naniesionego pokrycia wynosiła 0,4 ± 0,03 mm. Kokile zalewane w kolejności od najmniejszej do największej średnicy odlewu, zapewniając odpowiednio optymalne temperatury zalewania, równe 1380-1300°C [5].

Żeliwo wyjściowe wytapiano w indukcyjnym piecu elektrycznym o wyłożeniu zasadowym i pojemności 60 kg. Temperatura spustu mierzona termoparą PtRh10 - Pt wynosiła 1450 ÷ 1470°C. Bezpośrednio przed spustem żeliwo odsiarczano w piecu dodatkiem 1% sody, a na dno wygrzanej kadzi wprowadzano 0,5% kriolitu. Jako materiałów wsadowych użyto surówek O.B. 2040, LH21, wysokowęglowej surówki syntetycznej oraz złomu stalowego i żelazostopów Mn06 i S175. Sferoidyzację żeliwa wyjściowego przeprowadzono zaprawą

FeSiMg10, wprowadzaną do kadzi w ilości 2% (dodatek magnezu wynosił 0,196%) za pomocą dzwonu grafitowego. Po sferoidyzacji żeliwo modyfikowano żelazo-krzemem Si75 w ilości 0,5%. Odlewy po zalaniu usuwano z kokil w temperaturze 900 ÷ 750 °C i studzono w powietrzu.



Rys. 1. Wpływ składu chemicznego i grubości ścianki odlewu na własności mechaniczne żeliwa sferoidalnego

Wyniki badań

Badania obejmowały 18 wytopów, na które składała się seria 9 wytopów właściwych, powtórzonych jednokrotnie w dowolnej kolejności. Skład chemiczny badanych wytopów zmieniał się zgodnie z planem badań przedstawionym w tablicach 2 i 3. Odchylenie wartości średniej z dwu wytopów od założonych poziomów zawartości C, Si, Mn nie przekraczało 0,1% zawartości danego pierwiastka. Zawartość pozostałych składników żeliwa mieściła się w następujących granicach: 0,03 ÷ 0,08%P, 0,01 ÷ 0,017%S, 0,03 ÷ 0,05% Mg.

Ocena podstawowych własności mechanicznych poprzedzona została oględzinami przełomów, badaniami metalograficznymi oraz pomiarem rozkładu twardości na przekroju poszczególnych odlewów w celu określenia stopnia zabielenia. Wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie i udarność określano na próbkach wytoczonych ze środka odlewów, zakwalifikowanych jako niezabielone. Wymiary próbki wytrzymałościowej d_o = 10 mm zgodne z PN-69/H-83124. Jako kryterium występowania warstwy zabielonej w odlewie przyjęto ustaloną na drodze licznych badań graniczną wartość twardości powierzchniowej odlewu, równą 330HB.

Podstawowe własności mechaniczne dla wybranych wytopów o charakterystycznych składach chemicznych, w tym i wytopu z obniżoną zawartością Mn, przedstawiono w tablicy 1 oraz na rys. 1.

Tablica 1

Podstawowe własności mechaniczne odlewów kokilowych z żeliwa sferoidalnego; średnica odlewu 25 mm

Skład chemiczny w %					Wytrzymałość na rozciąganie R_m daN/mm^2	Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ daN/mm^2	Wydłużenie A_5 %	Udarność 1) K daNm/cm^2	Twardość 2) HB
C	S_i	M_n	P	S					
3,40	2,31	0,60	0,083	0,011	71,1	51,3	2,4	2,35	286
3,42	3,09	0,73	0,038	0,016	66,9	48,6	2,8	3,90	257
3,76	3,34	0,36	0,060	0,013	54,8	40,1	5,0	6,21	246
3,45	3,45	0,06	0,041	0,017	50,0	38,7	6,4	7,15	229

1) określana na próbkach 10 x 10 x 55 mm bez karbu

2) mierzona na łbie próbki wytrzymałościowej.

Twardość odlewów kokilowych

W celu linearyzacji zależności pomiędzy HB o grubością ścianki odlewu, w oparciu o dane z rys. 1 dokonano przekształcenia logarytmicznego zmiennej X_1.

Na podstawie wyników badań obliczono za pomocą minikomputera WANG2200 współczynniki regresji i błąd ich oznaczenia. Równanie regresji uwzględniające efekty liniowe oraz wszystkie współdziałania przyjmuje następującą postać:

$$y = 324,81 - 20,93x_1 - 21,19x_2 + 13,93x_3 - 84,56x_4 + 1,81x_1x_2 +$$
$$+ 1,69x_1x_3 + 3,91x_1x_4 - 0,56x_2x_3 + 1,69x_2x_4$$

$$- 2,69x_3x_4 - 2,56x_1x_2x_4 - 1,06x_1x_2x_4 - 1,69x_1x_3x_4 - 1,94x_2x_3x_4 +$$

$$+ 0,31x_1x_2x_3x_4$$

Tablica 2

Przedział zmian zmiennych niezależnych, macierz planowania badań i wyniki pomiarów twardości powierzchniowej odlewów (średnia z 6 pomiarów)

		Skład chemiczny w %			Grubość ścianki odlewu X_1 ($\ln X_1$)	Twardość $HB_{2,5/184}$
		C	Si	Mn		
Poziom podstawowy $X_i = 0$		3,6	2,8	0,5	ok. 12,5	
Przedział zmian		0,2	0,6	0,2		
Poziom górny $X_i = +1$		3,8	3,4	0,7	30	
Poziom dolny $X_i = -1$		3,4	2,2	0,3	6	
Oznaczenie kodowe / Nr pomiaru	x_o	x_1	x_2	x_3	x_4	$\bar{y}$
1	+	-	-	-	-	451
2	+	+	-	-	-	383
3	+	-	+	-	-	391
4	+	-	-	+	-	469
5	+	-	-	-	+	266
6	+	+	+	-	-	346
7	+	+	-	+	-	426
8	+	+	-	-	+	226
9	+	-	+	+	-	426
10	+	-	+	-	+	226
11	+	-	-	+	+	289
12	+	+	+	+	-	383
13	+	+	+	-	+	198
14	+	+	-	+	+	258
15	+	-	+	+	+	248
16	+	+	+	+	+	211
17	+	0	+0,4	-0,6	0	296
Błąd pomiaru $S[\bar{y}] = 12,7$, $f = 80$; $S[b_i] = 3,18$; $S_R = 11,1$, $f = 11$						

Ocena istotności współczynników regresji za pomocą testu t - Studenta dla prawdopodobieństwa 95% ($t_{95}(80) = 2,02$) wskazuje na nieistotność współdziałań wszystkich rzędów. Po korekcie i zamianie zmiennych kodowych na zmienne naturalne otrzymano następujące równanie regresji:

$$HB = 1020 - 104{,}6\,C - 35{,}3\,Si + 69{,}6\,Mn - 105\,\ln X_1$$

Sprawdzenie adekwatności przybliżenia liniowego za pomocą testu Fischera oraz hipotezy zerowej $\sum b_{ii} = 0$ przez dokonanie pomiaru 17 (dwa wytopy o składzie zbliżonym do środka planowania), dla którego różnica $y_f - y_o = 12HB$ jest równa błędowi pomiaru, daje podstawę do stwierdzenia, że otrzymane równanie regresji jest adekwatne. Współczynnik korelacji wielokrotnej równy jest 0,93.

Wytrzymałość na rozciąganie oraz wydłużenie odlewów

Przeprowadzone badania wykazały praktyczną niemożliwość uzyskania niezabielonych odlewów o średnicy 12 mm, przy intensywności stygnięcia $B_i = 0{,}1$, natomiast otrzymanie niezabielonych odlewów o średnicy 16 mm wymaga stosowania żeliwa o składzie zbliżonym do górnego poziomu rozpatrywanego zakresu zawartości węgla i krzemu. Jest to powodem ograniczenia zakresu rozpatrywanych grubości ścianek odlewu (tablica 3), przy określaniu zależności wytrzymałości na rozciąganie i wydłużenia od składu chemicznego.

W oparciu o wyniki badań (tablica 3) otrzymano następujące równania regresji, opisujące zależność wytrzymałości na rozciąganie (y_1) i wydłużenia (y_2) od składu chemicznego i grubości ścianki odlewu:

$$y_1 = 59{,}73 - 2{,}94x_1 - 3{,}79x_2 + 1{,}64x_3 - 4{,}59x_4 + 0{,}09x_1x_2 +$$
$$+ 0{,}36x_1x_3 + 0{,}14x_1x_4 - 0{,}21x_2x_3 - 0{,}26x_2x_4 - 0{,}39x_3x_4 + 0{,}31x_1x_2x_3 +$$
$$+ 0{,}70x_1x_2x_4 - 0{,}26x_1x_3x_4 + 0{,}06x_2x_3x_4 + 0{,}34x_1x_2x_3x_4$$

$$y_2 = 5{,}04 + 0{,}71x_1 + 0{,}79x_2 - 0{,}96x_3 + 1{,}41x_4 + 0{,}11x_1x_2 -$$
$$- 0{,}28x_1x_3 + 0{,}19x_1x_4 + 0{,}09x_2x_3 + 0{,}06x_2x_4 - 0{,}43x_3x_4 - 0{,}09x_1x_2x_3 +$$
$$+ 0{,}09x_1x_2x_4 - 0{,}26x_1x_3x_4 + 0{,}04x_2x_3x_4 - 0{,}06x_1x_2x_3x_4$$

Ocena istotności współczynników regresji ($b_i > t_{95}(16)s\left[b_i\right]$) wskazuje na istotność jedynie efektów liniowych, wobec tego po korekcie i przekształceniu zmiennych przytoczone równania przyjmą następującą postać:

$$R_m = 157{,}2 - 14{,}7C - 6{,}3Si + 8{,}2Mn - 10{,}5\ln X_1 \quad daN/mm^2,$$

$$A_5 = -19{,}6 + 3{,}55C + 1{,}32Si - 4{,}8Mn + 3{,}22\ln X_1 \quad \%.$$

Tablica 3

Przedziały zmian, macierz planowania i wyniki pomiarów wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenie odlewów kokilowych z żeliwa sferoidalnego

	%C	%Si	%Mn	X_1 (LnX_1)	Wytrzymałość na rozciąganie R_m daN/mm^2 1)	Wydłużenie A_5 % 1)
Poziom podstawowy $X_i = 0$	3,6	2,8	0,5	ok. 20		
Poziom zmian	0,2	0,6	0,2			
Poziom górny $X_i = +1$	3,8	3,4	0,7	30		
Poziom dolny $X_i + -1$	3,4	2,2	0,3	12,5		

Oznaczenie kodowe / Nr pomiaru	x_o	x_1	x_2	x_3	x_4	$\bar{y}_1$	$\bar{y}_2$
1	+	-	-	-	-	68,7	3,0
2	+	+	-	-	-	62,4	4,0
3	+	-	+	-	-	63,3	4,2
4	+	-	-	+	-	72,0	1,8
5	+	-	-	-	+	60,8	6,0
6	+	+	+	-	-	54,8	5,4
7	+	+	-	+	-	68,3	2,8
8	+	+	-	-	+	54,8	8,2
9	+	-	+	+	-	65,6	3,4
10	+	-	+	-	+	52,8	6,8
11	+	-	-	+	+	64,7	3,8
12	+	+	+	+	-	59,5	4,4
13	+	+	+	-	+	47,2	10,4
14	+	+	-	+	+	56,5	4,4
15	+	-	+	+	+	53,5	5,6
16	+	+	+	+	+	50,9	6,4
17	+	0	0,4	-0,6	0	56,6	5,6

Błąd pomiaru $\bar{y}_1$ $S[\bar{y}] = 2,34$, $f = 16$ $S[b_i] = 0,59$; $S_R = 1,71$, $f = 11$
$\bar{y}_2$ $S[\bar{y}] = 0,904$, $f = 16$, $S[b_i] = 0,23$; $S_R = 0,72$, $f = 11$

1) średnia z dwóch pomiarów.

Kontrola równań za pomocą testu Fischera i hipotezy zerowej $\sum b_{ii} = 0$ potwierdza adekwatność przedstawienia wyników badań wielomianem pierwszego stopnia. Współczynnik korelacji wielokrotnej dla pierwszego równania wynosi 0,905, a dla drugiego 0,882.

Analiza otrzymanych równań regresji wskazuje, że również przy odlewaniu kokilowym żeliwa sferoidalnego intensywność oddziaływania grafityzującego węgla i krzemu można z dużym przybliżeniem wyrazić stosunkiem 3:1. Rośnie natomiast wpływ manganu na własności mechaniczne, przy czym szczególnie wyraźnie uwidacznia się jego wpływ na obniżenie wydłużenia. Żeliwo sferoidalne odlewane do kokil charakteryzuje się dużą wrażliwością na grubość ścianki odlewu w rozpatrywanym zakresie składu chemicznego. Wzrost skłonności do zabielania związany ze zmniejszeniem grubości ścianki odlewu, w omawianym przypadku należy jednakże traktować jako łączny efekt wrażliwości żeliwa i ponadkrytycznej zawartości Mg w żeliwie. Przyjęty w badaniach dodatek magnezu jest wartością minimalną dla odlewów o średnicy 60 mm i znacznie przekracza krytyczną ilość magnezu dla odlewów najcieńszych [3].

Zarówno uzyskane własności mechaniczne dla skrajnych składów chemicznych żeliwa jak i przeprowadzone badania metalograficzne wykazały praktyczną niemożliwość uzyskania w odlewach kolilowych z żeliwa sferoidalnego struktury czysto perlitycznej lub ferrytycznej. Również w przeprowadzonych wytopach żeliwa z obniżoną zawartością Mn (tablica 1) uzyskano w odlewach o średnicy 40 i 60 mm strukturę ferrytyczną, zawierającą do 5% perlitu.

Wnioski

W celu wyeliminowania zabielenia i uzyskania wysokich własności wytrzymałościowych i plastycznych odlewów kokilowych w stanie surowym, należy szczególną uwagę zwrócić na zapewnienie bardzo małej intensywności stygnięcia dla najcieńszych ścianek odlewu.

Przyjęty zakres zmian składu chemicznego (S_c = 0,95 ÷ 1,15) zapewnia otrzymanie żeliwa sferoidalnego o własnościach mechanicznych w stanie surowym, określonym przez gatunki od Zs4505 do Zs7002.

Podane w pracy matematyczne zależności pomiędzy własnościami mechanicznymi a składem chemicznym pozwalają na dokonanie zarówno szczegółowej analizy wpływu poszczególnych czynników, jak i wyboru optymalnego wariantu składu chemicznego w projektowanym procesie technologicznym. Spełnienie podstawowych założeń pracy pozwala na wykorzystanie otrzymanych zależności do szybkiej oceny własności mechanicznych odlewów w oparciu o dany skład chemiczny żeliwa sferoidalnego.

LITERATURA

1. Wiejnik A.J.: Rasčot otliwki, Mašinostroienie, Moskwa, 1964.
2. Wiejnik A.J.: Kokil, Nauka i technika, Mińsk, 1972.
3. Gawroński J., Krajczy B.: ZN.Pol.Śl. Mechanika 48, Gliwice, 1973, 77.

4. Nalimow W.W., Czernowa N.A.: Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych, WNT, Warszawa, 1967.
5. Dubinin N.P. i in.: Kokilnoje l i t j e. Sprawočnoje posobie, Mašinostrojenie, Moskwa, 1967.

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ КОКИЛЬНОГО ЛИТЬЯ СФЕРОИДАЛЬНОГО ЧУГУНА

Р е з ю м е

Был проведен анализ и были подобраны самые благоприятные условия кокильного литья обеспечивающие медленное остывание отливки в кокили (Bi_1 = 0,1). Полученные результаты исследований являются основой для разработки математической зависимости между основными механическими свойствами (твердость, временное сопротивление и удлинение) и содержанием углерода, кремния и марганца в чугуне а также толщиной стенки кокильной отливки.

OPTIMIZATION OF SOME PARAMETERS OF DUCTILE CAST IRON CHILL CASTING

S u m m a r y

An analysis has been carried out and the most favourable conditions for chill casting have been selected, permitting low intensity of cooling the casting in the permanent mould (Bi_1 = 0,1), the obtained results form the basis for elaborating the mathematical dependencies between the basic mechanical properties - (HB, R_m A_5) and the carbon, silicion and manganese content of cast iron and the thickness of the chill casting wall.