

Jerzy Sokołowski

Instytut Odlewnictwa Politechniki Śląskiej

OPTIMALIZACJA NIEKTÓRYCH PARAMETRÓW KOKILOWEGO ODLEWANIA ŻELIWA SZAREGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań nad ustaleniem zależności najistotniejszych parametrów kokilowego odlewania żeliwa szarego. Końcowym efektem badań i analizy statystycznej są nomogramy pozwalające na ich praktyczne wykorzystanie.

Wstęp

Zastosowanie odlewów żeliwnych z grafitem płatkowym zarówno o kształtach prostych jak i złożonych wykonanych w kółłach spotkało się w ostatnich latach ze zwiększonym zainteresowaniem w krajowym przemyśle budowy maszyn, samochodowym, armatury itp.

Rozpowszechnienie technologii odlewania kokilowego, pomimo jej niewątpliwych zalet jak: możliwość pełnej automatyzacji procesów, wyższe własności mechaniczne odlewów, poprawa jakości powierzchni i lepsza dokładność wymiarowa, napotyka na trudności, głównie ze względu na skłonność "żeliwa kokilowego" do powstawania zabielań [1-26] przy podwyższonych szybkościach krzepnięcia.

Istniejące próby przedstawienia wzajemnej zależności pomiędzy własnościami mechanicznymi a parametrami procesu technologicznego zdają się walczyć na ich przydatność techniczną, ale z uwagi na małą powtarzalność wyników posiadają ograniczone zastosowanie. Wobec takiego stanu rzeczy istnieje konieczność podjęcia badań z tego zakresu.

Badania własne

C e l, z a k r e s b a d a ń

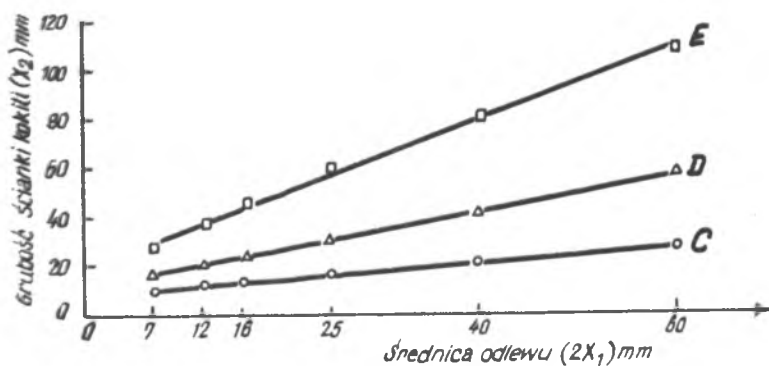
Celem badań jest ustalenie zależności pomiędzy składem chemicznym żeliwa szarego, grubością ścianek odlewów i kokil a własnościami mechanicznymi.

Badania przeprowadzono na odlewach o składzie chemicznym: C = 2,6 do 3,7% oo 0,2%; Si = 1,2 do 3,1% oo 0,4%, Mn w ilości 0,4 i 0,8%; P poniżej 0,3%; S poniżej 0,1%. Żeliwo modyfikowano modyfikatorem wieloskładnikowym [33].

Tablica 1

Wymiary odpowiadających sobie odlewów typu A i B

Typ odlewu (kokilli)	Numer odlewu (kokilli) wymiary odlewów, mm					
	1	2	3	4	5	6
A \emptyset	7	12	16	25	40	60
B \square	5 x 8	9 x 12	11 x 18	17 x 29	27 x 47	36 x 76



Rys. 1. Zależność grubości ścianek kokil od średnicy odlewów

Próbki do badań wykonane w postaci odlewów walcowych o zmiennej średnicy (typ A) oraz odpowiadających im pod względem pojemności cieplnej - odlewów prostokątnych (typ B) [17, 25] - tablica 1. Dla odlewów o tych samych wymiarach stosowano trzy komplety kokil żeliwnych (C, D, E) o zmiennej grubości ścianek - rys. 1 [28-32].

Badania wstępne

Badania wstępne przeprowadzono na 32 wytopach wykonanych w kokilach z kompletu E. Wnęki kokil pokrywano warstwą pokrycia ochronnego o składzie: 20% talku, 77% wody, 3% szkła wodnego, której grubość wahała się od 0,3 do 0,5 mm.

Przeprowadzono również próby nanoszenia pokrycia modyfikującego z sadzy acetylenowej. Próby te dały jednak wynik negatywny.

Podgrzewanie kokil do temperatury początkowej równy $350 \pm 50^\circ\text{C}$ realizowano przy pomocy palników gazowych. Temperaturę mierzono termoparą przylgową i zestawem kredek "Termochrom".

Stosunkowo duże różnice temperatur początkowych kokil i grubości pokrycia ochronnego były podyktowane względami natury praktycznej. Wahania takie w warunkach produkcyjnych są częste i należało ustalić wpływ niestabilności tych parametrów na własności odlewów.

Dla zapewnienia identycznych materiałów wsadowych w całości badań, odlano z żeliwiaka odpowiednią ilość walców w trzech wersjach składu chemicznego. Brakujące ilości pierwiastków wg założonego składu uzupełniano stosując żelazostopy i surówki.

Do ciekłego metalu dodawano modyfikator o składzie chemicznym: 10,00% C; 40,77% Si; 23,98% Mn, 6,75% Ca; 1,04% Al; 16,94% Fe - w ilości 0,5% od ciężaru żeliwa [33].

Wytopy wykonano z bezrdzeniowym piecu indukcyjnym, o wyłożeniu zasadowym pod osłoną żużla, żeliwo przegrzane do temperatury $1450 + 15^{\circ}\text{C}$ modyfikowano a następnie zalewano do kokil. Temperatura zalewania wynosiła 1410 do 1360°C . Po zakrzepnięciu i ochłodzeniu do ok. 600°C odlewy usuwano z kokil.

Oznaczenie próbek z odlewów składa się z czterech oznów: pierwszy - oznacza numer wytopu, drugi - oznacza wymiar (numer) odlewu, trzeci - oznacza typ odlewu, czwarty - oznacza komplet kokil (zgodnie z tablicą 1 i rys. 1). Przykład oznaczenia:



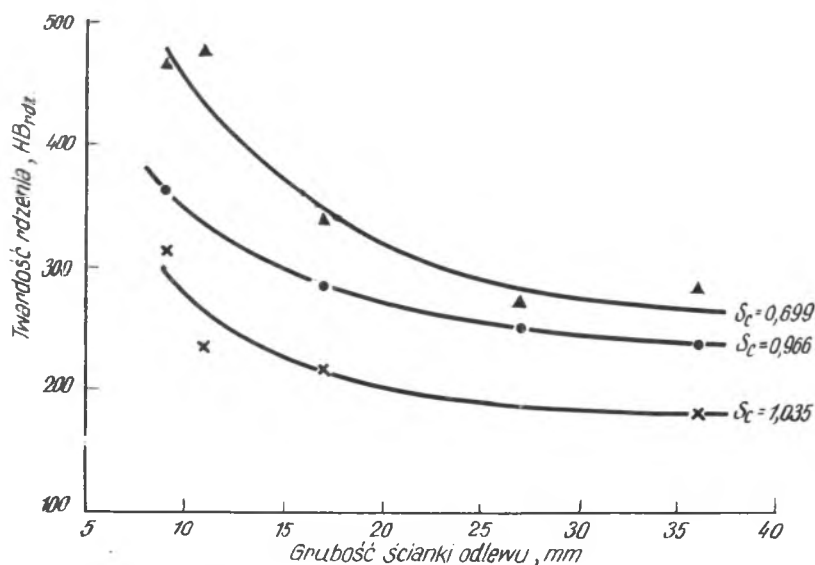
Badania twardości odlewów w rdzeniu i warstwach powierzchniowych wykonano metodą Brinella ($\text{HB}_{2,5/187,5/15}$) zgodnie z normą PN-59/H-04350. Wpływ składu chemicznego na własności żeliwa określano stosując stopień nasycenia S_G . Na rys. 2 przykładowo pokazano wpływ stopnia nasycenia S_G i zmiany wymiarów na twardość rdzenia odlewów prostopadłościennych w stanie surowym.

Przeprowadzenie badań makro- i mikroskopowych i skorelowanie ich z badaniami twardości odlewów surowych pozwoliły na podanie orientacyjnego kryterium podziału odlewów, w zależności od stopnia zabielenia:

I grupa odlewów:

- odlewy zabielenie na wekroś

$\text{HB}_{w.p.} > 310$ oraz $\text{HB}_{rdz.} > 310$



Rys. 2. Zależność twardości rdzenia odlewów od grubości ścianki odlewów prostopadłościennych (w stanie surowym) dla różnych stopni nasycenia

- odlewy zabilone na znacznej głębokości

$$HB_{w.p.} > 310 \quad \text{a} \quad HB_{rdz.} < 310$$

II grupa odlewów:

- odlewy szare i o małej głębokości zabilenia

$$HB_{w.p.} < 310 \quad \text{oraz} \quad HB_{rdz.} < 310$$

gdzie:

$HB_{w.p.}$ - twardość warstw powierzchniowych odlewów,

$HB_{rdz.}$ - twardość rdzenia odlewów.

Badania R_m po obróbce cieplnej (normalizowaniu i grafityzowaniu [29-32] wykonano zgodnie z normą PN-62/H-4310.

B a d a n i a w ł a ś c i w e

Wytopy do badań właściwych wykonano z żeliwa odlewane go do trzech kompletów kokil C, D i E różniących się grubością ścianek (rys. 1). W odróżnieniu od wytopów wstępnych wnętrza kokil pokrywano stałą grubością pokrycia ochronnego równą $0,4 \pm 0,02$ mm, temperaturę początkową kokil zawęzono do $350 \pm 20^\circ\text{C}$.

Topienie, modyfikacja i inne parametry procesu technologicznego nie różniły od sposobów stosowanych w wytopach wstępnych, z tym że zalanie prowadzono z kadełki szlachej. W tej serii badań wykonano 29 wytopów.

Próbki do analiz chemicznych o średnicy 10 mm przed i po modyfikacji zalano w osobnej kokili. Stwierdzono, że w wyniku modyfikacji w żeliwie średnio przysybywało 0,03% C; 0,13 % Si i 0,05 % Mn. Badania twardości odlewów w stanie surowym wykonano analogicznie jak poprzednio, pobierając próbki zgodnie z rys. 3.

Badania R_m przeprowadzono na odlewach z żeliwa szarego w stanie surowym, gdyż w wyniku wcześniejszych prób normalizowania uzyskiwano zawsze efekt grafityzacji, co powodowało obniżenie wytrzymałości na rozciąganie. Ponadto dla praktyki przemysłowej najbardziej interesująca jest możliwość otrzymywania odlewów kokilowych o założonych własnościach mechanicznych bez konieczności stosowania obróbki cieplnej.

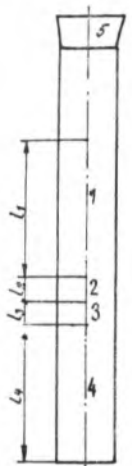
O m ó w i e n i e w y n i k ó w b a d a ń

Przeprowadzone badania wstępne uwiarydliły, jak znaczną rolę odgrywa utrzymanie stałości parametrów technologicznych procesu wykonania odlewu kokilowego z żeliwa. Niezwykle istotnymi czynnikami okazały się temperatura początkowa kokil oraz grubość pokrycia ochronnego. Pomimo że temperatura początkowa kokil utrzymywana była w granicach $\pm 50^\circ\text{C}$, a grubość pokrycia ochronnego wahała się od 0,3 do 0,5 mm, to z przebiegu zależności HB od wielkości odlewu dla większości wytopów można jedynie ocenić kierunek i charakter zmian twardości, z uwagi na znaczny rozrzut.

Zauważono również przy niewłaściwie dobranej ilości modyfikatora brak efektu modyfikacji (zbyt mała ilość modyfikatora), bądź tworzenie się dużych ilości żużla i wzrost gęstości metalu (zawyżona ilość modyfikatora). Stwierdzono, że najważniejsza ilość dodatku modyfikującego wynosi 0,5%.

Zauważono ponadto, że żeliwo zalane do kokil wykazuje znaczną "wrażliwość" na grubość ścianki odlewu, tzn. że HB i R_m osiągają maksymalne wartości dla odlewów o najmniejszych wymiarach.

Poczyniono także próby przedstawienia zależności mechanicznych w zależności od grubości odlewu przy uwzględnieniu składu chemicznego, wyrażonego stopniem nasycenia S_c . Stwierdzono, że im S_c ma wartość większą, tym twardość żeliwa jest mniejsza oraz mniejsze są różnice twardości pomiędzy odlewami cienkościnnymi i grubościennymi. Zależności te dla trzech róż-



Wymiar odlewu mm	l_1 mm	d_0 mm	l_2 mm
ϕ 7 ϕ 5 x 8	80	6,5 4,5 x 7,5	25
ϕ 12 ϕ 9 x 12	52	8	6
ϕ 16 ϕ 11x18	54	10	6
ϕ 25 ϕ 17x29	78	16	7

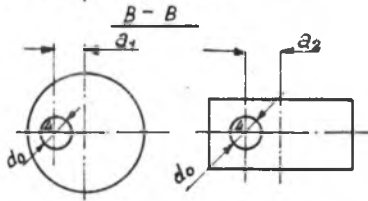
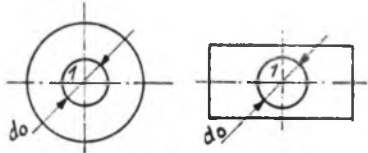
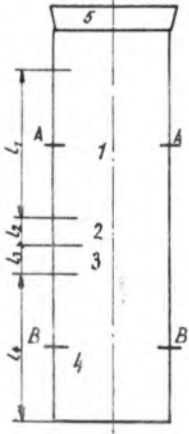
a/

Oznaczenia:

- 1, 4 - próbki do badania wytrzymałości na rozciąganie / $l_1 = l_4$ /
- 2 - próbka do badania twardości i struktury w stanie normalizowanym i po grafityzacji
- 3 - próbka do badania twardości i na zgląd metalograficzny - w stanie surowym / $l_2 = l_3$ /
- w miejscu pomiędzy próbką 2 i 3 wykonano przełom
- 5 - lejek wlewowy

b/

A - A



Wymiar odlewu mm	l_1 mm	d_0 A - A mm	d_0 B - B mm	a_1 mm	a_2 mm	l_2 mm
ϕ 40 ϕ 27 x 47	78	16	12	10	11,7	8
ϕ 60 ϕ 37 x 76	95	20	20	15	19	8

Rys. 3. Schemat pobierania próbek z odlewów do badań właściwych

nych S_c odpowiadających żeliw podutektycznemu, eutektycznemu i nadutektycznemu, przedstawia rys. 2.

Badania metalograficzne odlewów surowych potwierdzają wyniki badań własności mechanicznych. W odlewach cienkościennych np. próbka 19,2 AE (rys. 4) wykazuje w rdzeniu i na brzegu strukturę żeliwa białego z drobnymi "gniazdami" perlitu, wewnątrz których wydzielona jest niewielka ilość grafitu ($HB_{rdz.} = 451$; $HB_{w.p.} = 491$).

W odlewie grubościennym, próbka 19,5AE (rys. 5), struktura żeliwa jest jeszcze bardziej zróżnicowana na przekroju. Rdzeń posiada typową strukturę perlityczną z grafitem płatkowym ($HB_{rdz.} = 266$), zaś brzeg charakteryzuje się strukturą żeliwa połowicznego ($HB_{w.p.} = 406$). Wzrost S_c z 0,850 w przypadku próbki 19,5AE (rys. 5) do 0,966 dla próbki 6,5AE (rys. 6); spowodował widoczne zmiany strukturalne, gdyż na brzegu próbki 6,5AE wydzielili się bardzo drobny grafit o rozłożeniu międzydendrytycznym w osnowie perlitu i małej ilości ferrytu ($HB_{w.p.} = 260$), zaś w rdzeniu tych próbek nie obserwuje się znaczniejszych zmian ($HB_{rdz.}$ próbki 19,5AE wynosi 266, a dla próbki 6,5 AE - $HB_{rdz.} = 249$).

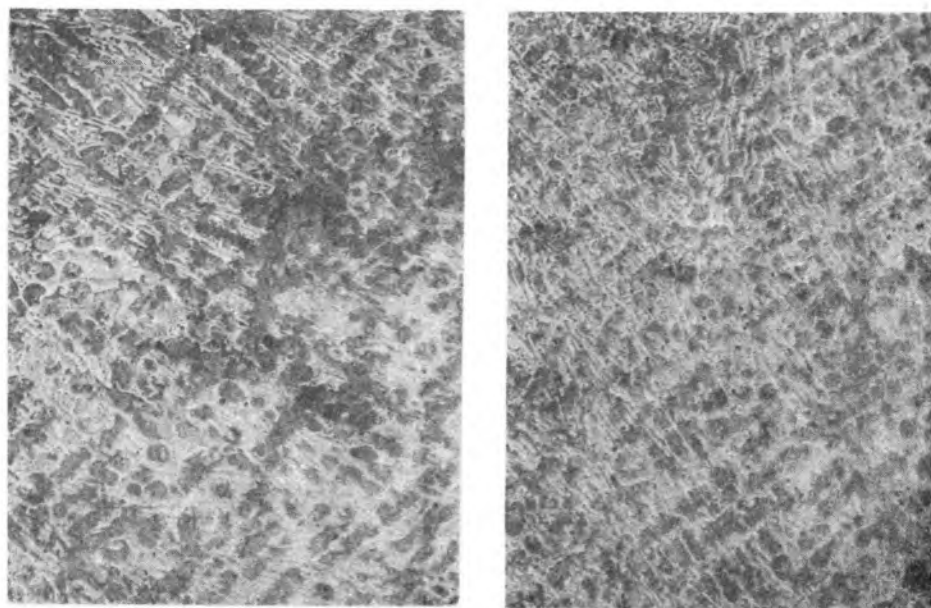
Próbka 25,3AE (rys. 7), o zbliżonych S_c do próbki z wytopu 6, ale o małej średnicy, równej 16 mm, wykazuje praktycznie taką samą strukturę na całym przekroju, tj. drobny grafit o rozłożeniu międzydendrytycznym w osnowie perlitu ($HB_{rdz.} = HB_{w.p.} = 285$).

Na dwadzieścia dziewięć wytopów do badań właściwych w 7-miu z nich zdecydowana większość odlewów wykazała zabielenie na wskroś lub na znacznej głębokości. Reszta wytopów posiadała w dużej części odlewy szare, co w głównej mierze zależne było od składu chemicznego oraz grubości ścianek odlewów. Dla tych dwudziestu dwóch wytopów ($C + Si$) $\approx 5,0 \div 6,7\%$.

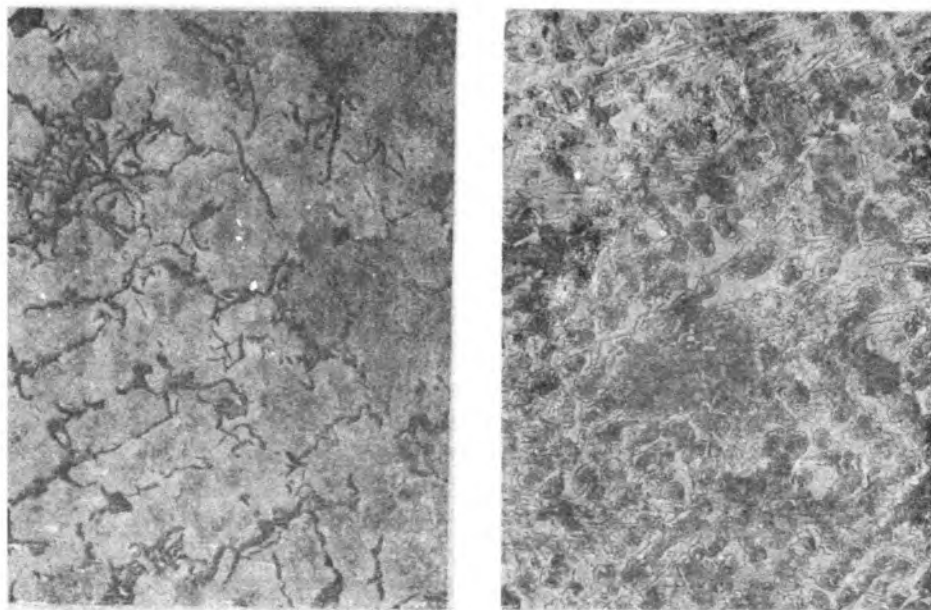
Przeprowadzone badania własności mechanicznych odlewów wykazały, że zgodnie z oczekiwaniami rozrzut wyników jest zdecydowanie mniejszy w stosunku do serii wytopów wstępnych, na co niewątpliwie wpłynęło utrzymywanie warunków cieplno-fizycznych kokil w wąskich tolerancjach.

Wykonane badania pozwoliły na określenie najkorzystniejszej zawartości węgla i krzemu oraz sumy ($C + Si$), zapewniających uzyskanie wymaganych własności mechanicznych i strukturalnych dla zmiennej grubości ścianek odlewów. Zawartość ta powinna zapewnić uzyskanie żeliwa szarego przy możliwie niskiej twardości i dużej wytrzymałości na rozciąganie. Przykład zależności C i Si oraz ($C + Si$) od średnicy odlewu przedstawia rys. 8.

W trakcie badań struktury i twardości stwierdzono, że odlewy prostopadłościenne odpowiadające pod względem pojemności cieplnej odlewom walcowym silniej ulegają zabieleniom. Wynika to z większej powierzchni odprowadzenia ciepła oraz efektu oddziaływania narozty. Stąd optymalny skład chemiczny, nadający odlewom prostopadłościennym, a zwłaszcza o małych grubościach ścianek, strukturę żeliwa szarego, przesuwa się do większych zawartości węgla i krzemu - w stosunku do odlewów walcowych.

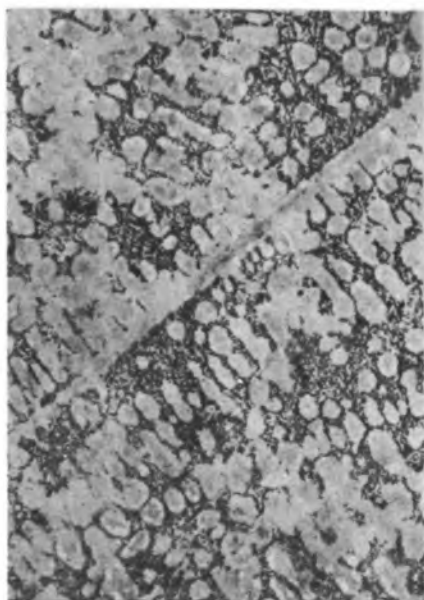
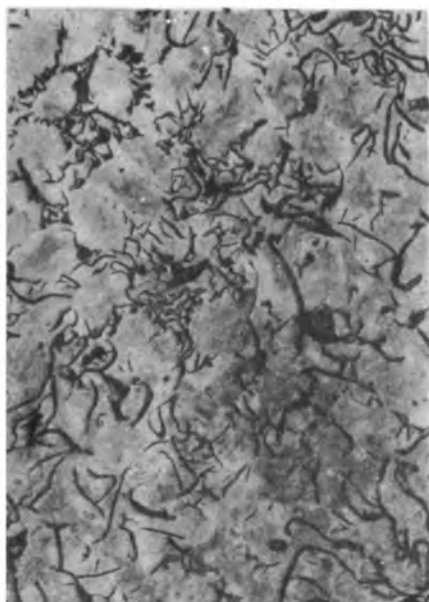


Рyb. 4

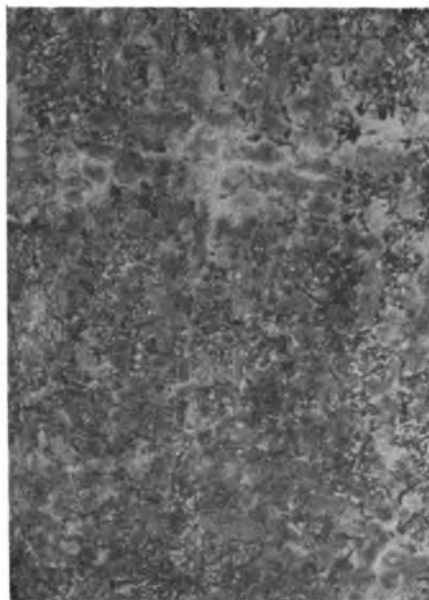


Рyb. 5

Numer rysunku	Powiększenie x	Oznaczenie próbki	Skład chemiczny odlew, %	Opis struktury
	Trawienie			
4	$\frac{100}{3\% \text{ Nital}}$	19.2AE	<p>C₀ - 3,11 Si - 1,72 Mn - 0,52 P - 0,162 S - 0,076</p>	<p>Rdzeń (po lewej), brzeg (po prawej). Żeliwo białe z niewielką ilością grafitu w "gniazdach" perlitu</p>
5	$\frac{100}{3\% \text{ Nital}}$	19.5AE	<p>C₀ - 3,11 Si - 1,72 Mn - 0,52 P - 0,162 S - 0,076</p>	<p>Rdzeń (po lewej) - grafit płatkowy w osnowie perlitycznej. Brzeg (po prawej) - żeliwo białe z wydzieleniami grafitu w "gniazdach" perlitu</p>

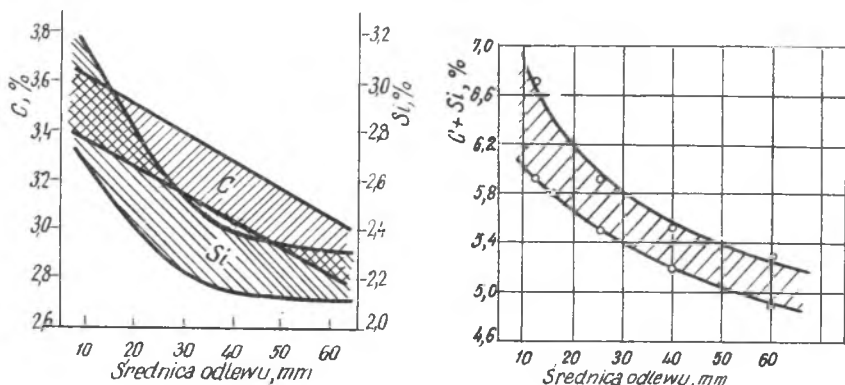


Rys. 6



Rys. 7

Numer rysunku	Powiększenie x	Oznaczenie próbki	Skład chemiczny odlew, %	Opis struktury
	Trawienie			
6	$\frac{100}{3\% \text{ Nital}}$	6.5AE	<p>C_c - 3,20 Si - 2,80 Mn - 1,01 P - 0,240 S - 0,071</p>	Rdzeń (po lewej) - grafit w osnowie perlitu. Brzeg (po prawej) - grafit o rozłożeniu międzydendrytycznym, w osnowie perlitu oraz niewielkie ilości ferrytu
7	$\frac{100}{3\% \text{ Nital}}$	25.3AE	<p>C_c - 3,38 Si - 2,46 Mn - 0,99 P - 0,205 S - 0,072</p>	Rdzeń (po lewej), brzeg (po prawej). Bardzo drobny grafit w osnowie perlitycznej



Rys. 8. Zależność C i Si (a), oraz (C + Si) (b) przy zawartości Mn od 0,4 do 0,8% dla uzyskania odlewów o strukturze żeliwa szarego z kompletu kokil E

Dla odlewów prostopadkościennych wykonanych w kokilach z kompletu E ($X_2 \max$) wzrost (C + Si) wynosi o około 5% w stosunku do odlewów walcowych.

A n a l i z a s t a t y s t y c z n a w y n i k ó w b a d a ń

W analizie statystycznej uwzględniono własności mechaniczne odlewów z badań właściwych, które zakrzepły jako całkowicie szare. W celu ilościowego ustalenia zależności pomiędzy składem chemicznym żeliwa, grubością ścianek odlewów i kokil, a własnościami mechanicznymi, zastosowano metodę regresji wielokrotnej [27].

Rozwiązania szukano jako równania liniowego dla różnej postaci matematycznej wielkości wymiaru charakterystycznego odlewu (X_1 ; $\ln X_1$; $\frac{1}{X_1}$) [28]. Jako hipotezę ostateczną przyjęto następujące zależności pomiędzy zmienną objaśnianą (R_m^{HB}), a wartościami zmiennych objaśniających:

$$R_m^{HB} = \alpha_0 + \alpha_C \cdot C + \alpha_{Si} \cdot Si + \alpha_{Mn} \cdot Mn + \alpha_P \cdot P + \alpha_S \cdot S + \alpha \frac{1}{X_1} \cdot \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_1} \quad (1)$$

Przy użyciu stopnia nasycenia S_c równanie to ma postać:

$$R_m^{HB} = \beta_0 + \beta \frac{1}{X_1} + \beta_{S_c} \cdot S_c + \gamma \quad (2)$$

Tablica 2

Wyniki estymacji równania typu I dla twardości warstw powierzchniowych HB_{w.p.}

Oznaczenie odlewu i kokili	Oceny parametrów strukturalnych równania typu I oraz współczynników korelacji cząstkowej						Oceny parametrów stochastycznych		
	a_0	$\frac{a_c}{HB;C}$	$\frac{a_{Si}}{HB;Si}$	$\frac{a_{Mn}}{HB;Mn}$	$\frac{a_P}{HB;P}$	$\frac{a_S}{HB;S}$	$\frac{a_1/X_1}{HB:1/X_1}$	Wariancja resztowa S_i	Współcz. korel. wielokrotn. R_i
AC	418,07	$\frac{= 37,68}{= 0,35}$	$\frac{= 41,00}{= 0,61}$	$\frac{32,88}{0,29}$	$\frac{= 292,57}{= 0,22}$	$\frac{126,49}{0,11}$	$\frac{640,19}{0,81}$	18,54	0,85
AD	422,73	$\frac{= 42,41}{= 0,41}$	$\frac{= 40,17}{= 0,62}$	$\frac{29,64}{0,30}$	$\frac{= 135,68}{= 0,12}$	$\frac{141,89}{0,14}$	$\frac{644,26}{0,85}$	16,05	0,87
AE	386,27	$\frac{= 35,72}{= 0,39}$	$\frac{= 32,97}{= 0,55}$	$\frac{39,72}{0,43}$	$\frac{= 35,73}{= 0,03}$	$\frac{= 15,69}{= 0,02}$	$\frac{612,76}{0,82}$	15,31	0,85
BC	475,55	$\frac{= 65,89}{= 0,57}$	$\frac{= 35,03}{= 0,51}$	$\frac{29,77}{0,32}$	$\frac{= 15,74}{= 0,01}$	$\frac{= 205,94}{= 0,19}$	$\frac{506,12}{0,83}$	15,76	0,85
BD	473,95	$\frac{= 61,56}{= 0,58}$	$\frac{= 34,11}{= 0,49}$	$\frac{38,74}{0,37}$	$\frac{= 154,68}{= 0,15}$	$\frac{= 42,13}{= 0,04}$	$\frac{498,86}{0,81}$	15,05	0,86
BE	476,58	$\frac{= 49,15}{= 0,46}$	$\frac{= 50,57}{= 0,65}$	$\frac{73,47}{0,62}$	$\frac{= 187,82}{= 0,16}$	$\frac{= 56,68}{= 0,06}$	$\frac{470,02}{0,72}$	16,02	0,85

Tablica 3

Wyniki estymacji równania typu II dla twardości warstw powierzchniowych $HB_{w.p.}$

Oznaczenie odlewu i kokili	Oceny parametrów strukturalnych równania typu II oraz współczynników korelacji cząstkowej			Oceny parametrów stochastycznych	
	b_0	$\frac{b_{1/X_1}}{HB, \frac{1}{X_1}}$	$\frac{b_{S_c}}{HB, S_c}$	Wariancja resztowa S_i	Współcz. korel. wielokr. R_i
AC	398,55	$\frac{567,01}{0,72}$	$\frac{-219,86}{-0,64}$	22,25	0,77
AD	413,97	$\frac{565,75}{0,78}$	$\frac{-225,59}{-0,68}$	19,04	0,82
AE	350,89	$\frac{556,98}{0,74}$	$\frac{-148,82}{-0,52}$	18,75	0,76
BC	372,39	$\frac{479,51}{0,79}$	$\frac{-201,77}{-0,66}$	17,72	0,81
BD	396,63	$\frac{479,28}{0,77}$	$\frac{-217,17}{-0,72}$	16,95	0,83
BE	423,21	$\frac{340,71}{0,48}$	$\frac{-217,91}{-0,57}$	23,66	0,68

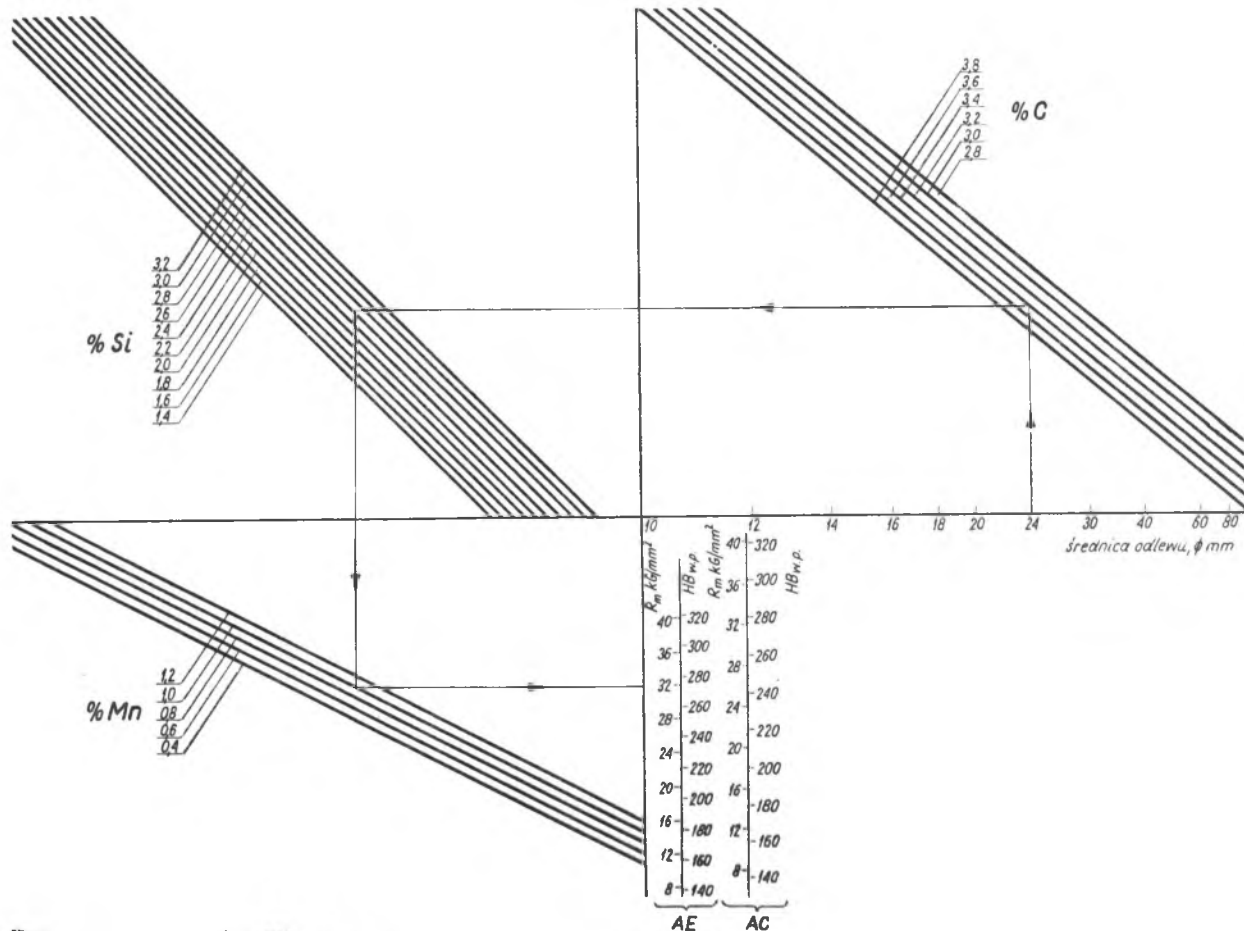
gdzie:

$\alpha_0; \beta_0$ - składniki wolne,

$\alpha_{1/X_1} \dots \alpha_{1/X_1}; \beta_{1/X_1} \dots \beta_{S_c}$ - współczynniki mierzące wpływ odpowiednich zmiennych na kształtowanie się zmiennej objaśnianej,

$\xi; \eta$ - składniki losowe, ujmując wpływ czynników przypadkowych i innych nie ujętych w zależności.

Przykładowe wyniki estymacji współczynników relacji (1) i (2) dla twardości warstw powierzchniowych na podstawie obliczeń na maszynie cyfrowej Odra 1013 przedstawiono w tablicy 2 i 3. Wartość krytyczna współczynnika korelacji cząstkowej pomiędzy HB a zmianami poszczególnych składników przy poziomie ufności 95% dla równania typu (1) wynosi ok. 0,27, a dla typu (2) ok. 0,26. Oceny współczynników korelacji równania (1) dla $HB_{rdz.}$ wskazują na nieistotność wpływu fosforu i manganu oraz siarki dla odlewów prostopadłościennych z kompletu kokil C.



Rys. 9. Nomogram zależności $HB_{w.p.}$ AC i AE oraz R_m AC i AE żeliwa szarego (modyfikowanego) odlewane do kokil od składu chemicznego (węgiel, krzem, mangan) i średnicy odlewu

W równaniu (1) dla $HB_{w.p.}$ (tablica 2) istotny okazuje się wpływ fosforu i siarki.

Oszacowana relacja typu (1) dla R_m wskazuje przede wszystkim na wyraźną istotność wpływu wymiarów odlewu oraz zawartości krzemu. Istotność pozostałych składników chemicznych zależy od grubości ścianek kokil. W miarę ich wzrostu na ogół rośnie wpływ składu chemicznego na R_m . Potwierdzenie tego faktu wymagałoby jednak dalszych badań.

W równaniach, w których wpływ fosforu i siarki jest równocześnie istotny, fosfor wpływa ujemnie, a siarka dodatnio na wytrzymałość na rozciąganie. Ma to miejsce dla odlewów AE, BD i BE.

Oceny współczynników korelacji odnoszące się do S_c i $1/X_1$ są istotne, jednak współczynniki korelacji wielokrotnej są nieco niższe niż w równaniach typu (1).

Analiza statystyczna w pełni potwierdziła słuszność założeń przy obliczaniu wymiarów odlewów prostopadłościennych, odpowiadających pod względem pojemności cieplnej odlewom walcowym, tzn. czas krzepnięcia odlewów walcowych równy jest czasowi krzepnięcia odlewów prostopadłościennych. Przez analogię należy przypuszczać, że podobna zależność wystąpi dla twardości rdzenia, tzn. $HB_{rdz.A} = HB_{rdz.B}$.

Dla przykładowego składu chemicznego: 3,0% C; 2,5% Si, 0,4% Mn; 0,1% P 0,05% S i odlewu o średnicy 30 mm wykonanego w kokili z kompletu C, z równania otrzymuje się wartość $HB_{rdz.AC} = 231$, a dla odpowiadającego odlewu prostopadłościennego $HB_{rdz.BC} = 219$. Wynika stąd, że twardość mieszcząca się w obszarze wariancji resztowej, wynoszącej ok. ± 16 HB.

Uzyskane wyniki estymacji równania typu (1) dla kokil AC i AE przedstawiono w postaci nomogramu na rys. 9, ilustrującego zależność $HB_{w.p.}$ oraz R_m od średnicy odlewu, procentowej zawartości węgla, krzemu i manganu. Ze względu na nieistotność i różnokierunkowość wpływu fosforu i siarki na własności mechaniczne, przyjęto średni poziom 0,125% P i 0,053% S (zakres wahań P wynosił 0,100 - 0,175%, a S od 0,017 do 0,095%) i skorygowano składnik wolny o odpowiednie wartości, wynikające z przyjętych średnich.

Przy posługiwaniu się nomogramem przydatny jest rys. 8, podający najkorzystniejszą ilość węgla i krzemu w żeliwie.

Z uwagi na ograniczoną objętość niniejszej pracy nie zamieszczono wszystkich wyników analizy statystycznej. Zainteresowani mogą korzystać z niepublikowanych materiałów w Instytucie Odlewnictwa Politechniki Śląskiej.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i ich analizy oraz obliczeń statystycznych opracowano następujące wnioski:

Dla otrzymania odlewów o dobrej jakości konieczne jest utrzymanie następujących parametrów:

temperatura przegrzenia	$1450^{\circ}\text{C} + 15^{\circ}$,
temperatura zalewania	$1410^{\circ}\text{C} \div 1350^{\circ}\text{C}$,
temperatura początkowa kokil	$350^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}$,
grubość pokrycia ochronnego kokil ok.	0,4 mm.

Optymalna ilość modyfikatora wynosi 0,5% niedomiar modyfikatora sprawia, że brak jest efektów modyfikacji, a nadmiar powoduje gęstopłynność metalu i powstawanie dużych ilości żużla.

Żeliwo odlewane do kokil posiada wysoką twardość; jako twardość graniczną pomiędzy żeliwem szarym i białym można przyjąć równą ok. 310 HB.

Optymalna zawartość sumaryczna węgla i krzemu niezbędna dla uzyskania żeliwa szarego wynosi ok. 5÷7%.

Przeprowadzona analiza statystyczna pozwala stwierdzić, że korelacja pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie, twardością rdzenia lub warstwy powierzchniowej a składem chemicznym (C, Si, Mn) i grubością ścianki odlewu jest wystarczająco dobra. Przy użyciu współczynnika nasycenia korelacja ta jest nieco słabsza.

Pierwiastkiem decydującym o twardości żeliwa jest krzem, w mniejszym stopniu węgiel, a mangan działa jedynie na twardość warstwy powierzchniowej.

Największy wpływ na wytrzymałość na rozciąganie posiada grubość ścianki odlewu i zawartość krzemu. Pozostałe parametry wpływają dużo słabiej.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy statystycznej wykonano nomogram wiążący skład chemiczny, grubość ścianki odlewu i kokili z własnościami mechanicznymi. Nomogram ten pozwala na optymalny dobór tych parametrów.

LITERATURA

1. Sakwa W.: Materiały na VII Zebranie Sprawozdawcze Komitetu Hutnictwa, PAN, t. II, Krynica, 1974, 89.
2. Zakrzewski J., Martynowicz K.: Prace Instytutu Odlewnictwa, Zeszyty specjalne, 13, Kraków, 1973, 1.
3. Sakwa W.: Współczesne metody wytopu żeliwa. Politechnika Śląska, skrypt Gliwice 1970.
4. Dubinin N.P.: Чугунное лит'е в металлических формach. Машигиз Moskva 1956.
5. Petričenko A.M.: Teoria i tehnologija kokilnogo lit'ja, Technika, Kijew, 1967.
6. Górny Z. i in.: Odlewanie kokilowe stopów żelaza, WNT, Warszawa 1972.
7. Skrocki R.R., Wallace J.F.: Transactions of the American Foundrymens Society, 77, 1970, 297.

8. Lönberg K., Schöndorf P.: Giesserei techn. Wissen, Beihefte, 2, 1965, 8.
9. Kümmerle R.: Giesserei, 21, 1964, 625.
10. Skrocki R.R., Wallace J.F.: Transactions of the American Foundrymen's Society, 78, 1970, 126.
11. Vejník A.J.: Raččet otlivki, Moskva 1964, Mašinostroenie.
12. Tomovic M., Cikara D.: Liwarstwo, 17, 1970, 161.
13. Wittekopf D.: Przegląd Odlewnictwa 3, 1965, 87.
14. Kolesničenko A.G.: Litejnoje Proizvodstvo, 2, 1961, 20.
15. Ishikawa K., Tsunoda E.: The Journal of the Japan Foundrymen's Society. 42, 1970, 605.
16. Komissarov V.A.: Litejnoje Proizvodstvo, 10, 1969, 21.
17. Kobelev N.I. i in.: Litejnoje Proizvodstvo, 10, 1969, 10.
18. Kobelev N.I. I in.: Litejnoje Proizvodstvo, 8, 1970, 13.
19. Zuthoff A.I. i in.: Die Wanddickenabhängigkeit von Gusseisenkokillenguss, Internationaler Giessereikongress - Düsseldorf 1971.
20. Frye G.: Modern Casting, 54, 1968, 52.
21. Januszewicz P.: Przegląd Odlewnictwa, 7-8, 1960, 221.
22. Francis J.L.: Foundry Trade Journal, 118, 1965, 443.
23. Clark D.: Modern Casting 54, IV, 1968, 65.
24. Drabina J.: Przegląd Odlewnictwa, 1, 1972, 30.
25. Vejník A.I.: Osnovy teplovoj teorii lit'ja. Sb. "Voprosy teorii litejnych processov". Moskva 1960 Mašgiz.
26. Dubinin N.P. i in.: Kokil'noe lit'e. Spravočnoe posobie. Moskva 1967. Izd. Mašinostroenie.
27. Van der Warden B.L.: Mathematische Statistik (tłum.ros.), Moskva, 1960.
28. Sakwa W., Gawroński J., Sokołowski J.: Materiały na VII Zebranie Sprawozdawcze Komitetu Hutnictwa PAN, II, 1974, 111.
29. Gawroński J., Łabęcki M., Sokołowski J.: Wybrane zagadnienia z odlewnictwa. Politechnika Śląska i STOP Gliwice, 1972.
30. Gawroński J., Łabęcki M., Sokołowski J.: Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika 48, 1973, 45.
31. Gawroński J., Łabęcki M., Sokołowski J.: Prace Instytutu Odlewnictwa MPC - Kraków, Zeszyty specjalne, 14, 1973, 1.
32. Gawroński J., Łabęcki M., Sokołowski J.: Prace Instytutu Odlewnictwa MPC - Kraków, Zeszyty specjalne, 17, 1974, 43.
33. Zgłoszenie patentowe nr NP-774/161.

ОПТИМИЗАЦИЯ НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ КОКИЛЬНОЙ ОТЛИВКИ
СЕРОГО ЧУГУНА

Р е з ю м е

В работе представлены результаты исследований по определению зависимости основных параметров кокильного литья серого чугуна. Конечным эффектом исследований и статистического анализа являются номограммы дающие возможность практически использовать результаты исследований.

OPTIMIZATION OF SOME PARAMETERS OF GREYCASTIRON CHILL CASTING

S u m m a r y

In the elaboration are presented investigation results on establishing dependencies of the most essential parameters of chill casting of grey-cast iron. The final effect of the research and statistical analysis are nomograms permitting their practical utilization.