ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: Mechanika z. 62 Nr kol. 530

Jerzy SOKOŁOWSKI, Mariusz ŁABĘCKI,
Józef GAWROŃSKI, Bernard KRAJCZY

PRZEGLĄD ŚWIATOWYCH KIERUNKÓW BADAŃ ŻELIWA SZAREGO ODLEWANEGO DO FORM METALOWYCH

Streszczenie. Artykuł monograficzny opracowany przez autorów na podstawie światowej literatury w sposób syntetyczny prezentuje główne kierunki badań nad żeliwem szarym odlewanym do form metalowych. Omówiono wpływ najistotniejszych czynników na strukturę i własności mechaniczne, osiągnięcia w zakresie obróbki cieplnej oraz dotychczasowy stan wykresów strukturalnych i nomogramów kokilowego żeliwa szarego.

1. Wstęp

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

Szereg placówek naukowych w kraju podjęło ostatnio temat "żeliwo kokilowe" [1]. Powoduje to, że w porównaniu ze stopniem rozwoju innych metod odlewanie kokilowe zajmuje jedno z czołowych miejsc. Obecnie w Polsce metodą kokilową produkuje się około 4,5% odlewów z żeliwa szarego, co stanowi poważny postęp w stosunku do stanu tej technologii od roku 1965, kiedy udział żeliwnych odlewów kokilowych wynosił niewiele ponad 2,3% [2].

Rozpowszechnienie tej technologii - pomimo jej niewątpliwych zalet, jak: możliwość pełnej automatyzacji procesów, wyższe własności mechaniczne odlewów, poprawa jakości powierzchni, wyższa dokładność wymiarowa - napotyka na trudności, głównie ze względu na skłonność "żeliwa kokilowego" przy podwyższonych szybkościach krzepnięcia do powstawania zabieleń. Aby spowodować daleko idące zahamowanie krzepnięcia w układzie metastabilnym, należy poznać zespół czynników wpływających na proces kształtowania się struktury odlewu kokilowego, co w efekcie umożliwi prawidłowe wykorzystanie tego specyficznego tworzywa konstrukcyjnego.

Podstawowymi czynnikami decydującymi o strukturze, a w konsekwencji i o własnościach mechanicznych odlewów wykonanych w kokilach są: skład chemiczny metalu, parametry termofizyczne i geometryczne odlewów i kokil, temperatura przegrzania i zalewania metalu, temperatura wybicia odlewu z kokil oraz inne zabiegi technologiczne, jak modyfikacja czy obróbka cieplna.

Warunki badań przeprowadzonych przez różnych autorów nie są ujednolicone i trudno w sposób jednoznaczny mówić wyłącznie np. o wpływie składu chemicznego na strukturę odlewu. Ponadto dostępne publikacje w czasopis-

mach i książkach na ogół ograniczają się do opisów technologii wykonywania odlewów kokilowych z żeliwa lub badań w wąskich granicach.

2. Wpływ niektórych czynników na strukturę żeliwa odlewanego do kokil

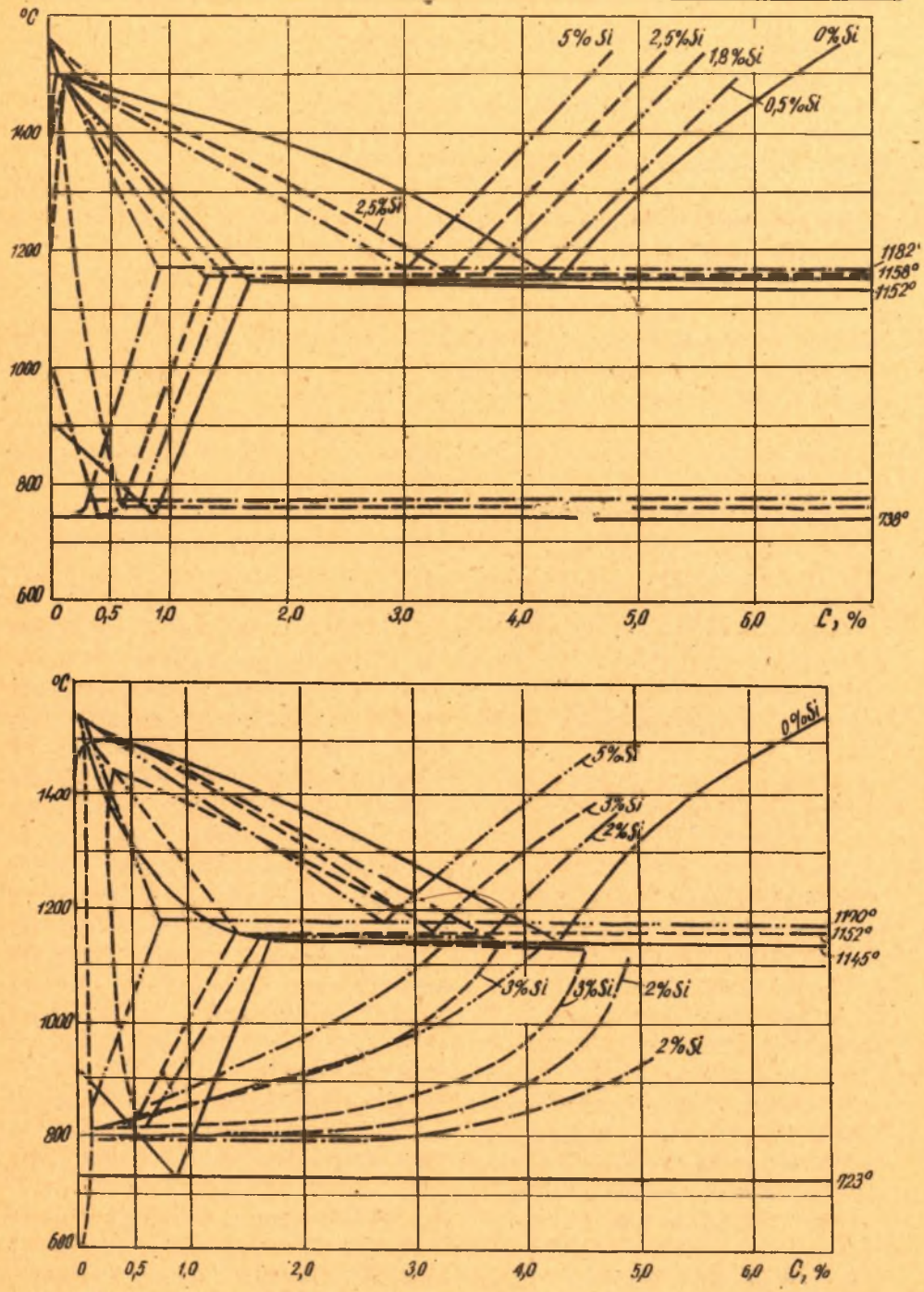
Żeliwo oprócz węgla zawiera szereg innych pierwiastków występujących jako dodatki stopowe lub zanieczyszczenia. Z pierwiastków tych dominujące znaczenie posiada krzem, który w sposób zasadniczy wpływa na strukturę tego typu stopów żelaza oraz na ich własności. Z tego też względu żeliwo należy rozpatrywać jako wieloskładnikowy stop żelaza z węglem, krzemem i innymi pierwiastkami. Jakkolwiek do analizy składników strukturalnych żeliwa wystarcza wykres dwuskładnikowy żelazo-węgiel, to do śledzenia zarówno stanu równowagi poszczególnych faz jak i przemian fazowych niezbędny staje się już co najmniej wykres trójskładnikowy żelazo-węgiel-krzem [3]. Podobnie jak dla układu podwójnego żelazo-węgiel, dla układu potrójnego (z krzemem) istnieją dwie odmiany wykresu równowagi: stabilny i niestabilny (rys. 1). Ogólnie biorąc, w układzie stabilnym linie przemian przebiegają w wyższych temperaturach niż w układzie metastabilnym. Wiąże się z tym wyższa temperatura punktów S, E oraz C. Z tych pseudopodwójnych wykresów równowagi Fe-C i $Fe-Fe_3C$ widać, że ze wzrostem ilości krzemu w żeliwie ilość węgla zmniejsza się w eutektoidzie, austenicie i fazie ciekłej.

W praktyce przy krystalizacji stopów technicznych zachodzi bardzo często nakładanie się obu odmian układu, tzn. występują obok siebie zarówno struktury układu stabilnego jak i niestabilnego. Typowym przykładem jest tutaj żeliwo szare, gdzie z reguły krystalizacja pierwotna przebiega w układzie stabilnym, natomiast wtórna w układzie metastabilnym.

Duży zakres szybkości krzepnięcia żeliwnych odlewów kokilowych i szybkości chłodzenia w zakresie przemian przy różnym składzie chemicznym jest przyczyną powstawania różnorodnych struktur. Przez zamianę tych czynników można otrzymywać struktury żeliwa białego, połowicznego oraz szarego w odlewach różnego typu oraz różnorodne struktury w jednym odlewie [5].

Ilościową i jakościową klasyfikację struktury osnowy metalicznej oraz grafitu żeliwa odlewanego do kokil przeprowadził Dubinin [4] w latach 1946--1956. Z uwagi na brak nowszych i kompleksowych badań na ten temat, szereg innych autorów [6, 7] powołuje się na to opracowanie.

Należy stwierdzić, że obecnie istnieją dwie światowe tendencje odnośnie najkorzystniejszych struktur odlewów kokilowych z żeliwa szarego. Przy produkcji odlewów sposobem Eatona dąży się do uzyskania struktury czysto ferrytycznej. Technologia ta rozpowszechniona jest głównie na zachodzie, chociaż ostatnio niektóre odlewnie krajowe zakupiły licencje na ten sposób. Odlewnicy radzieccy opierając się na wynikach wieloletnich doświadczeń praktycznych i badań naukowych, preferują odlewy kokilowe o strukturze perlitycznej.



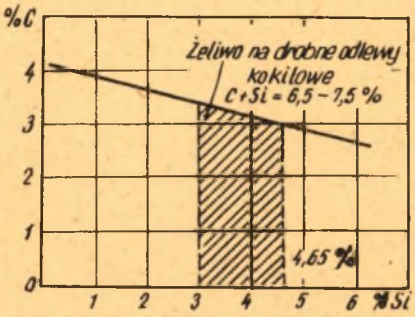
Rys. 1. Układ Fe-C (a) i Fe-Fe_3C (b) przy różnej zawartości krzemu [4]

Przeważająca ilość autorów stosowała na odlewy kokilowe żeliwo o składzie chemicznym, który się mieści w granicach: C = 3,0 - 3,8%, Si = 1,6 - - 3,2%, Mn = 0,2 - 1,0%, P do 0,6%, S < 0,13%, z wyjątkiem [8, 9, 10].

Zadania różnych autorów o wpływie składu chemicznego, a szczególnie krzemu, na strukturę i grafityzację żeliwa są podzielone.

Ogólnie przyjmuje się [6, 11], że dla żeliwa eutektycznego (S_c = 1,0) ilość węgla powinna znajdować się w zakresie 3,6 - 3,85%, a dla żeliwa podeutektycznego (S_c < 1) ilość węgla obniża się do 3,2%.

Wg Dubinina [4] węgiel i krzem z jednakową intensywnością wpływają na grafityzację żeliwa tylko w zakresie przemiany eutektoidalnej. Wykazano również, że przy wzroście ilości krzemu do 3,6% grafit staje się grubopłatkowy, a przy dalszym zwiększaniu jego ilości wtrącenia grafitu ponownie stają się drobne.



Rys. 2. Zakres zalecanych składów chemicznych żeliwa na drobne odlewy kokilowe [12]

Löhberg [10] stwierdził, że maksimum grafityzacji żeliwo wykazuje przy zawartości krzemu poniżej 4%. Podobnie stanowisko zajmuje Petriczenko [9], dodając, że dla kokilowych odlewów cienkościennych przekroczenie zawartości krzemu ponad 3,2 - 3,5% nie wpływa już hamującą na zabielania. Wg Popowa [12] górna granica zawartości krzemu na drobne odlewy kokilowe nie powinna przekraczać 4,65%, gdyż koncentracja węgla w austenicie jest prawie równa zeru i żeliwo o takiej zawartości Si powinno mieć strukturę składającą się z ferrytu i grafitu. Dalsze zwiększanie ilości krzemu nie wpływa na grafityzację żeliwa, albowiem ze wzrostem zawartości tego pierwiastka obniża się ilość węgla w stopie. Przy ilości 4,65% Si w żeliwie węgla jest 2,9%, a więc suma C + Si = 2,9+4,65= = 7,5%. Jest to optymalna granica zawartości sumy (C + Si) w żeliwie na odlewy kokilowe, zaś dolną granicę tej sumy można przyjąć na podstawie danych praktycznych jako równą 6,0 - 6,5%. Zakres zalecanej sumy węgla i krzemu w żeliwie na drobne odlewy kokilowe podaje rys. 2.

Analizując możliwość otrzymywania odlewów kokilowych z żeliwa szarego (bez obróbki cieplnej) Skrocki i Wallace [8] stwierdzili, że zwiększenie ilości krzemu do 6% korzystnie wpływa na powstawanie grafitu typu A (wg ASTM) i na eliminowanie z osnowy perlitu.

W białym żeliwie podeuektycznym [4] z wydzieleniami ledeburytu w miarę wzrostu ilości krzemu od 1,08% do około 1,67% ilość ledeburytu maleje z około 60% do 7%. W białym żeliwie wzrost ilości krzemu (jak również i szybkości krzepnięcia) wpływa na zmniejszenie wymiarów wtrąceń cementytu, zaś jego postać zmienia się z ziarnistej na iglastą. W żeliwie perlitycz-

nym podwyższenie ilości krzemu powoduje powstawanie grubopłytkowego perlitu, a ilość węgla związanego zmniejsza się.

Mangan rozdrabnia grafit oraz neutralizuje ujemny wpływ siarki [3, 4, 6, 8]. Zwiększenie ilości manganu powoduje powstawanie i wzrost ilości ledeburytu oraz sprzyja powstawaniu dużych ziarn cementytu [4]. Optymalną strukturę zawierającą minimalne ilości cementytu i perlitu autorzy amerykańscy [8] uzyskali dla ilości manganu i siarki określonej wzorem: % Mn = = 1,7% S + 0,2. Z badań Dubinina [4] wynika, że pełną neutralizację siarki zapewnia zawartość manganu obliczona ze wzoru Mn/S = 3,5. Zwiększenie zawartości manganu ponad obliczoną ilość potrzebną do związania siarki, może spowodować zabielenia. Aby zneutralizować jego antygrafityzujące działanie na każde 0,1% Mn, należy zwiększyć ilość krzemu o 0,02%. Jako optymalną ilość manganu w żeliwie kokilowym autorzy [4, 5] przyjmują 0,8%.

Z badań Skrockiego i Wallace [13] wynika, że dla przyjętych składów chemicznych żeliwo o niskiej zawartości manganu i siarki nie zawierało perlitu. Pojawiał się on w ilości około 5% przy 0,36% Mn i wzrastał do 15% perlitu ze wzrostem manganu do 1,08% (rys. 9). Fosfor podobnie jak krzem obniża rozpuszczalność węgla w temperaturze eutektycznej [3, 4, 6] i sprzyja grafityzacji.

Kümmerle [11] stwierdza, że mangan, fosfor i siarka w odlewach kokilowych wykazują analogiczne działanie jak w odlewach z form piaskowych.

Jak wynika z badań Skrockiego i Wallace [13], przy wzroście fosforu od 0,02% do 0,2% obserwowano wzrost ilości perlitu. Ponadto przy uwzględnieniu zmian ilości siarki obserwuje się różnice strukturalne żeliwa odlewanego do form piaskowych i kokil. Odlewy takie, wykonane z żeliwa niskosiarkowego (0,012% S), posiadały ferrytyczną strukturę osnowy. Zwiększenie zawartości siarki do 0,22% w takim samym żeliwie spowodowało otrzymanie osnowy perlitycznej ze śladowymi ilościami ferrytu w odlewach z form piaskowych. Natomiast odlewy kokilowe posiadały strukturę ferrytyczną z bardzo niewielką ilością perlitu.

Keilitz [14] stwierdził korzystniejszą strukturę masywnych odlewów żeliwnych wałków wykonanych w kokilach niż w formach piaskowych. Grafit w odlewach kokilowych jest rozdrobniony, a perlit drobnopłytkowy. Nie zauważono, aby w odlewach kokilowych ilość węgla związanego w rdzeniu była mniejsza niż w warstwach zewnętrznych, nie zaobserwowano również segregacji siarki.

Wszyscy autorzy są zgodni, że ilość siarki w odlewach kokilowych nie powinna przekraczać 0,13%.

Obok składu chemicznego, na strukturę niezwykle silnie wpływają parametry krzepnięcia i chłodzenia odlewu. Parametry te są charakteryzowane jako wielkości fizyczne, np. prędkość chłodzenia (^{o}C/min), szybkość krzepnięcia (mm/s), czy pośrednio przez podanie wymiarów ścianki odlewu, stosunku grubości ścianki odlewu do grubości ścianki kokil lub temperatury początkowej kokil itd. Dla wybranego składu chemicznego Köttgen [6,15] po-

dał krytyczne prędkości chłodzenia przy krzepnięciu dla uzyskania poszczególnych typów struktury żeliwa.

Wlodawer [16] wykazał, że pojęcie prędkości chłodzenia zawodzi w zakresie temperatur krytycznych. Obecnie uważa się [17], że pomimo pewnych niedostatków przy stosowaniu pojęcia szybkości krzepnięcia nie ma drugiego tak uniwersalnego parametru charakteryzującego proces krzepnięcia żeliwa.

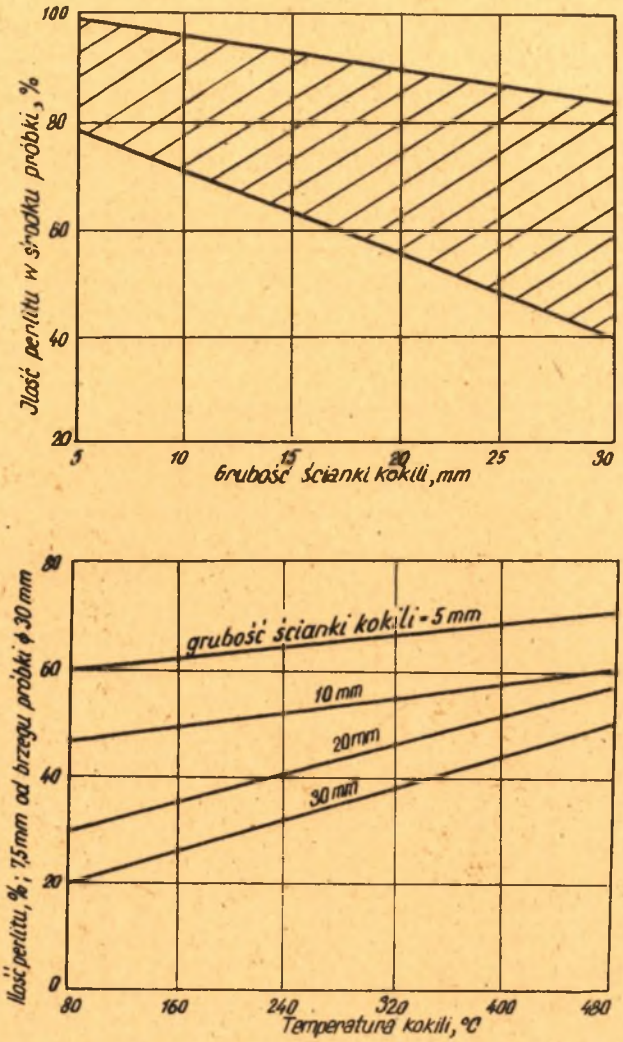
Tomovic [18] stwierdził, że w odlewach kokilowych z żeliwa o składzie chemicznym 3,2 - 3,5% C; 2,0 - 3,0% Si; 0,45 - 0,90% Mn; 0,5% P; 0,1% S strukturę perlityczną można otrzymać przy szybkości krzepnięcia 1,75 - - 3,0 mm/s zaś strukturę ferrytyczną tylko przy szybkości krzepnięcia 0,5 - 1,0 mm/s. Jednocześnie nie oznacza to, wg twierdzenia Petriczenki [5], że stopień grafityzacji żeliwa o różnym składzie chemicznym zależny jest liniowo od szybkości krzepnięcia.

Wpływ różnych czynników, a między innymi składu chemicznego i warunków krzepnięcia na struktury odlewów z żeliwa podają wykresy strukturalne i nomogramy w punkcie 2.4.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań Wittekopfa [19] nad wpływem zmian grubości ścianki kokil i temperatury kokil na strukturę żeliwa.

Strukturę warstw powierzchniowych odlewów kokilowych z żeliwa omówił Kolesniczenko [20], posługując się pojęciem sprowadzonej grubości ścianki oraz prędkości chłodzenia.

Odnośnie wpływu stanu ciekłego metalu przed zalaniem strukturę odlewów kokilowych, wykonanych z żeliwa szarego, istnieją w literaturze krańcowo różne zdania [4, 5, 21, 22]. Na przykład Zakrzewski [21], analizując wpływ przegrzania i wytrzymania ciekłego żeliwa na strukturę, stwierdza, że niska temperatura przegrzania żeliwa powoduje wytworzenie grubszych wydzieleń grafitu. Przetrzymanie przegrzanego metalu w kadzi powoduje krzepnięcie wg układu stabilnego. Wobec tego autor zaleca przegrzewać żeliwo szare do temperatur 1400 - 1500°C. Zalecenia te są sprzeczne z wynikami badań Ishikawy [22], które wykazały, że tendencja do utwardzania przez zabielanie żeliwa rośnie ze wzrostem temperatury przegrzania i zalewania. Głębokość warstwy utwardzonej jest szczególnie duża przy temperaturze przegrzania 1500°C. Zaś Petriczenko [5] prezentuje pogląd, że przegrzanie i wytrzymanie ciekłego żeliwa przed zalaniem sprzyja zwiększeniu zabielania. Przez podwyższenie temperatury zalewania można nieco obniżyć skłonność do zabielenia. Nie bez znaczenia jest również tzw. "dziedziczność" żeliwa po przetopie, na co zwraca uwagę Dubinin [4]. Stwierdza, że wysokie przegrzanie wsadu o dużych wydzieleniach grafitu sprzyja pozbyciu się dziedziczności i powoduje wydzielanie drobnego grafitu. Wytrzymanie ciekłego żeliwa w temperaturach bliskich temperaturze topnienia może zmniejszyć efekt działania wysokiego przegrzania. Przeprowadzone badania nad dziedzicznością żeliwa przy zastosowaniu surówek o przeciwstawnych tendencjach wykazały, że ilość ferrytu może się zmieniać w granicach od 30 do 80% [45].



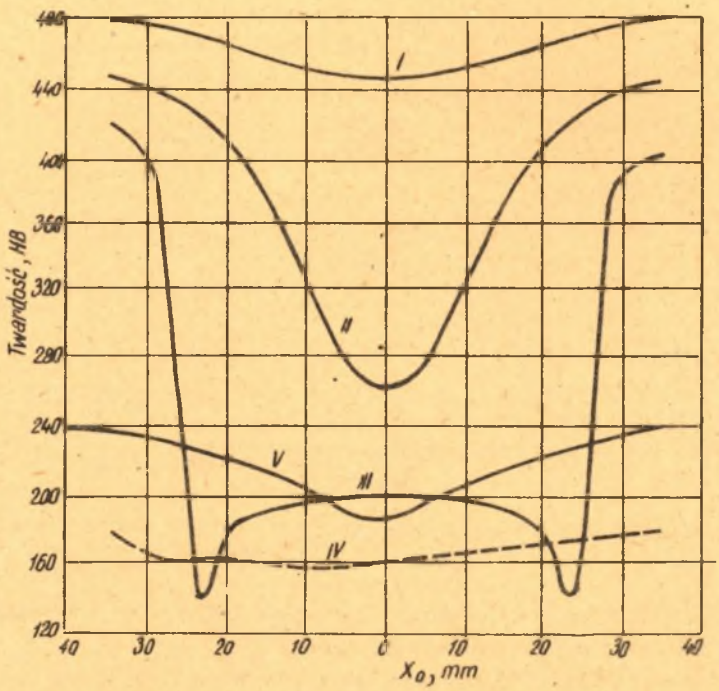
Rys. 3. Zależność procentowej zawartości perlitu od grubości ścianki kokili [19] i jej temperatury

Wybór wsadu jest więc jednym z bardzo ważnych czynników kształtujących strukturę w zależności od potrzeb użytkownika.

Stan ciekłego żeliwa można zmieniać w istotnym, a zarazem wymaganym kierunku, stosując zabieg modyfikacji, co ma szczególnie duże znaczenie w przypadku żeliwa odlewanego do kokil. W Japonii [22] badano wpływ modyfikacji i czasu wytrzymania w kokili na zabielenie odlewów. Mikrostruktura odlewów w zależności od czasów przetrzymania w kokili wskazuje na to, że proces krystalizacji zachodzi szybciej niż samowyżarzanie. Natomiast mo-

dyfikacja daje specjalnie dobre efekty dla żeliwa o niskim S_c, zwłaszcza przy skróconym czasie przetrzymywania odlewu w kokili. Skrocki i Wallace [13] stwierdzili, że modyfikacja B, Bi, Zn, Sb oraz Pb raczej nie wpływały na zawartość grafitu, antymon zaś sprzyjał tworzeniu się osnowy perlitycznej. Wprowadzenie 0,1% Bi oraz Te sprzyja pojawianiu się grafitu zwartego, przy jednoczesnej tendencji do zabieleń ścianek odlewów. Kompleksowe badania Komisarowa i in. [24] nad możliwością regulowania struktury odlewów kokilowych z żeliwa szarego pozwoliły na wyodrębnienie grup "preparatów" o działaniu grafityzującym lub stabilizującym. Skuteczność działania modyfikatorów zależy nie tylko od składu chemicznego żeliwa wyjściowego [25] ale i od szybkości krzepnięcia odlewu, typu modyfikatora, parametrów technologicznych [26].

Dla uzyskania struktury perlitycznej i zapobieżenia zabieleniom szereg autorów [5, 6, 45] zaleca stosowanie modyfikatorów złożonych.



Rys. 4. Zmiana twardości różnego typu odlewów w zależności od odległości punktu pomiarowego X_0 od środka próbki [5]

Oznaczenia: I - przełom biały, II - przełom połowiczny, III - przełom połowiczny anormalny (w warstwie powierzchniowej występuje struktura perlit + cementyt, pod powierzchnią - ferryt + grafit, w rdzeniu perlit +grafit) IV - przełom koloru popiołu (na całym przekroju występuje struktura ferryt + grafit), V - przełom szary

Strukturę żeliwa szarego bez zabieleń uzyskiwali Szreniawski i Pietrowski [46], stosując żeliwo z dodatkiem Al.

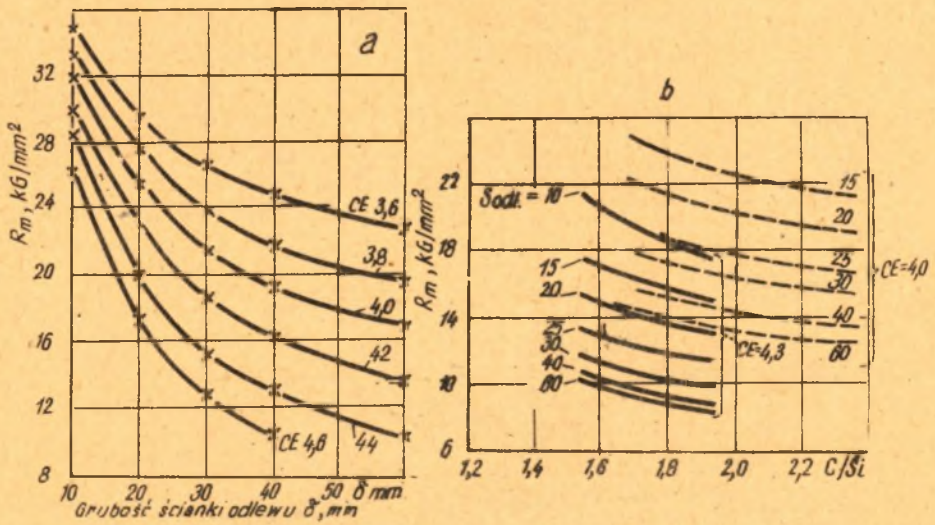
3. Własności mechaniczne odlewów z żeliwa odlewanego do kokil

Odlewanie żeliwa do kokil sprzyja powstawaniu biegunowo różnych własności mechanicznych. Przykładem tego może być wykres (rys. 4) przedstawiający zmiany twardości w zależności od odległości punktu pomiarowego od środka próbki.

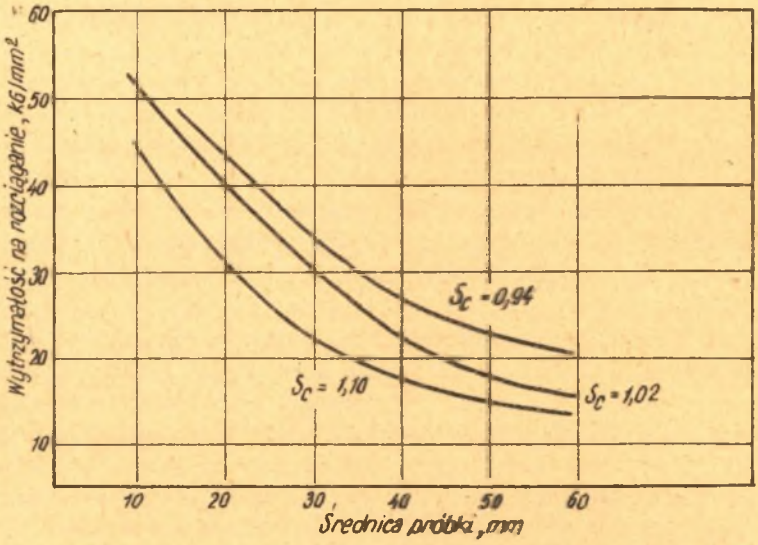
Własności mechaniczne żeliwnych odlewów kokilowych zależą od wielu czynników w sposób bardzo skomplikowany i złożony. Złożoność ta jest spowodowana nie tylko tym, że szybkość krzepnięcia w różny sposób wpływa na tworzenie się struktury żeliwa, ale i dlatego że pomiędzy szybkością krzepnięcia i stopniem grafityzacji nie ma prostej zależności [5].

Przykładami ilustrującymi zależności pomiędzy składem chemicznym (wyrażonym przez CE lub S_c), grubością ścianki odlewu a własnościami mechanicznymi są rysunki 5 i 6.

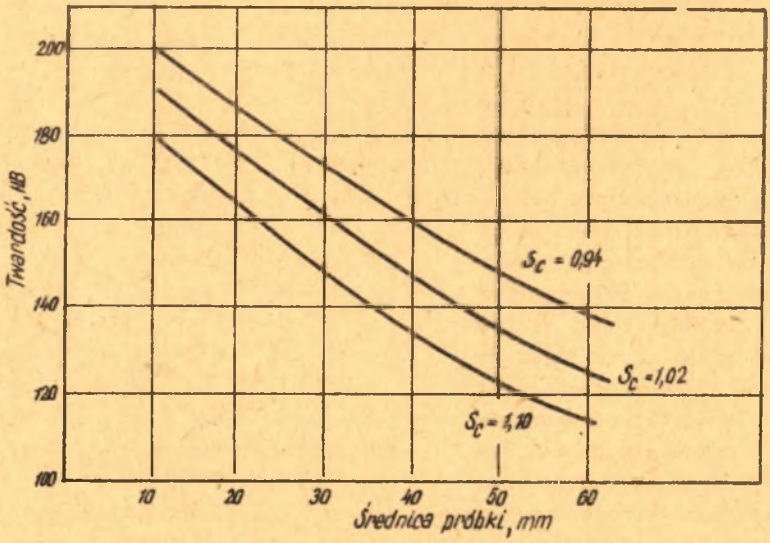
Jak wynika z powyższych wykresów, wrażliwość na grubość ścianki jest szczególnie duża dla odlewów cienkościennych. Dla podniesienia własności wytrzymałościowych należy stosować żeliwo ze zmniejszoną ilością węgla i podwyższoną ilością krzemu (rys. 5b). Sposób taki proponuje również Igualador [28]. Stosunek Si : C jest wg badań Kendo i in. [43] szczególnie i-



Rys. 5. Wpływ ekwiwalentu węglowego CE i grubości ścianki odlewu na wytrzymałość na rozciąganie (a) oraz wpływ CE, grubości ścianki odlewu oraz C/Si na R_m (b) [24]

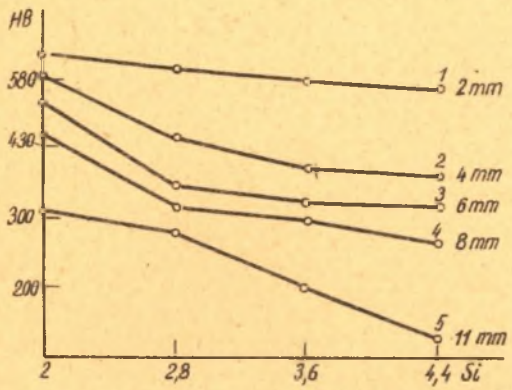


Rys. 6
a) zależność R_m od S_c i średnicy próbki



Rys. 6
b) zależność HB od S_c i średnicy próbki wg [27] (po obróbce cieplnej)

stotną wielkością charakterystyczną dla żeliwa szarego, odlewanego do form metalowych.



Rys. 7. Zależność twardości cienkościennych odlewów z żeliwa od ich grubości i zawartości krzemu [5]

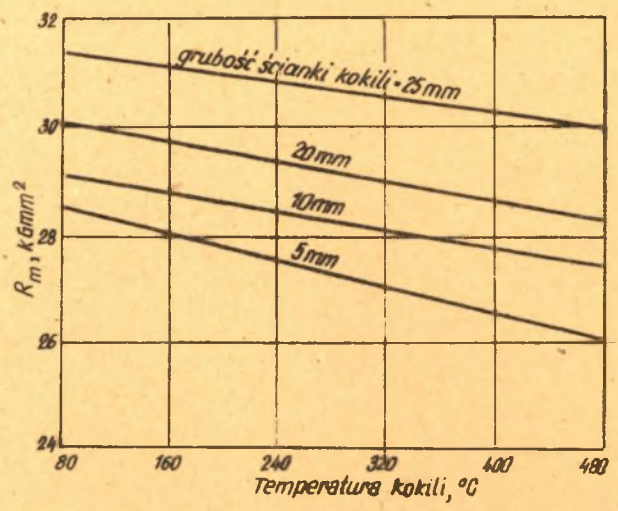
Wpływ ilości krzemu (przy temperaturze kokil $t_{2p} = 50^{o}C$, bez pokrycia ochronnego) na twardość cienkościennych odlewów kokilowych przedstawiono na rys. 7 [5]. Widać, że znaczny wzrost ilości krzemu, praktycznie do grubości ścianki odlewu 8 mm, nie spowodował uzyskania żeliwa szarego. Ze względu na skłonność cienkościennych odlewów o podwyższonej zawartości krzemu do paczenia się oraz z uwagi na obniżenie lejności autor zaleca nie przekraczać zakresu 3,2 - 3,5% Si, a zabielenia likwidować innymi zabiegami technologicznymi.

Wytrzymałość na rozciąganie niemodyfikowanego żeliwa przy stałym składzie chemicznym rośnie ze wzrostem ilości fosforu od 0,6 - 0,8%, nie jak sądzono dotychczas tylko od ilości 0,3 - 0,4%. Wzrost ten tłumaczony jest [25] rozdrobnieniem ziarn eutektyki i modyfikacją ferrytu. Dalszy wzrost ilości fosforu znacznie obniża wytrzymałość.

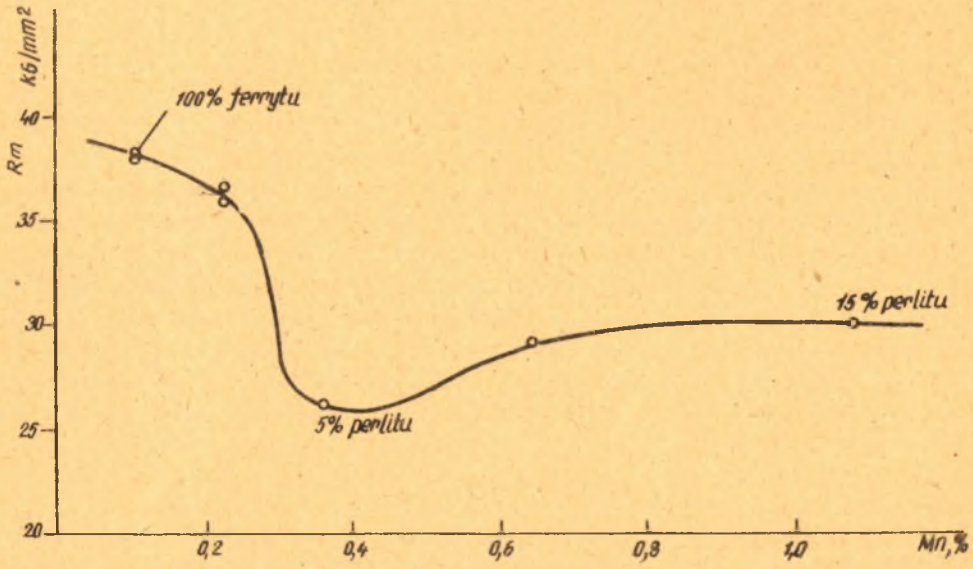
Przy stałej grubości ścianki odlewu (średnicy) grubość ta oraz początkowa temperatura kokil mają znaczny wpływ na własności wytrzymałościowe, co potwierdzają wyniki badań Wittekopfa [19], przedstawione na rys. 8.

Według Pétriczenki [5] do tej pory brak jest wiarygodnych danych o wpływie szybkości krzepnięcia na własności odlewów z żeliwa ferrytycznego. Z obserwacji autora wynika, że w odlewach o strukturze ferrytycznej wzrost szybkości krzepnięcia może okazać się korzystny, ale wymaga to modyfikowania żeliwa dużą ilością krzemu. Odlewy takie będą miały dużą wytrzymałość, ale jednocześnie będą kruche. Przełom ich jest koloru ciemnego popiołu, co tłumaczy się obecnością wydzieleń grafitu na granicach dendrytów. Struktura ta jest niewskazana dla odpowiedzialnych odlewów.

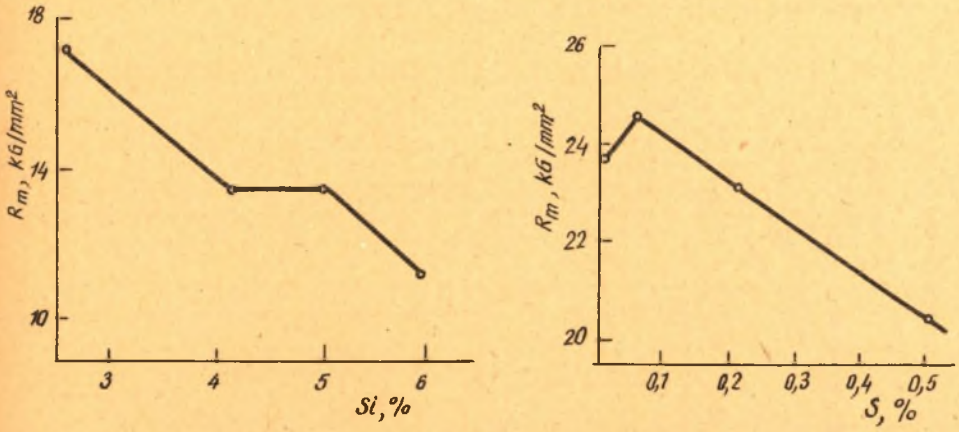
Ostatnio jednak, opublikowane przez szereg autorów [8, 13, 29], wyniki badań pozwalają na pełniejszą ocenę własności wytrzymałościowych żeliwa ferrytycznego odlewanego do kokil. Jak podkreśla Skrocki [13], w odlewach szybko studzonych wytrzymałość na rozciąganie pochodzi raczej od ciągliwych włókien ferrytycznych. Małe ilości perlitu albo steadytu powodują przerwanie ciągliwości pasm. Znaczny wpływ na powstawanie perlitu i na wytrzymałość na rozciąganie posiada mangan, co ilustruje rys. 9.



Rys. 8. Zależność wytrzymałości na rozciąganie od temperatury kokili i grubości jej ścianki [19]



Rys. 9. Wpływ zawartości Mn na wytrzymałość na rozciąganie [13]



Rys. 10. Wpływ procentowej zawartości krzemu (a) i siarki (b) na R_m [8]

Wzrost krzemu do ilości 6% powoduje, że odlew o średnicy około 30 mm posiada zaledwie wytrzymałość na rozciąganie około 11 kG/mm^2 - rys. 10 [8], przy czym przy zawartości krzemu od 4 - 5% wytrzymałość nie wykazuje tendencji malejącej.

Siarka do zawartości około 0,1% nieco podnosi R_m, ale po przekroczeniu tej granicy gwałtownie obniża wytrzymałość (rys. 10b).

4. Obróbka cieplna odlewów kokilowych

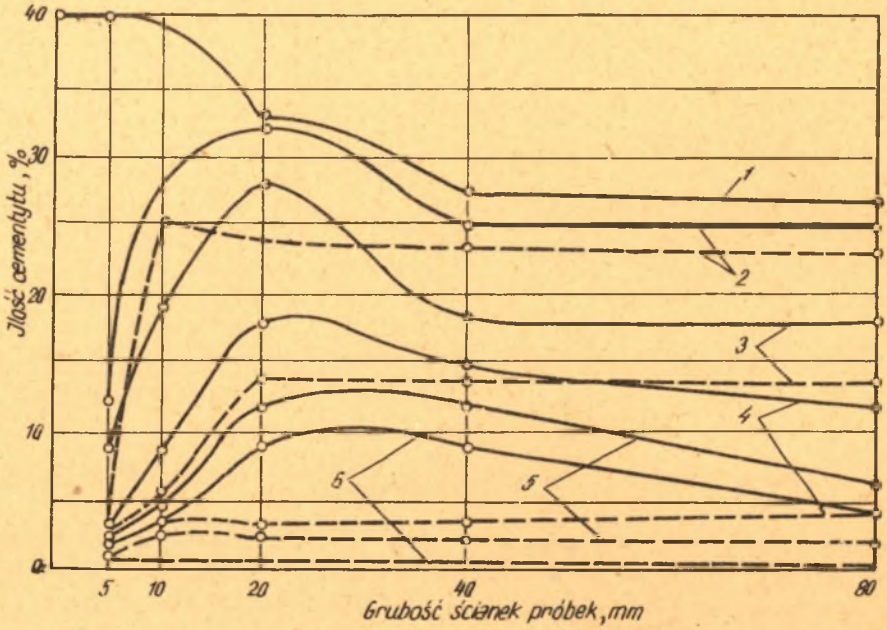
Celem usunięcia zabieleń odlewów kokilowych i ewentualnego podwyższenia własności mechanicznych przeprowadza się obróbkę cieplną.

Dla kokilowych odlewów cienkościennych, zdaniem wielu autorów - między innymi Komisarova [24], Kümerle [12], Petriczenki [5] - obróbka cieplna pozostaje ekonomicznie uzasadniona dla zaoszczędzenia kłopotów przy obróbce mechanicznej. Jedynie przy wyższych wymaganiach wytrzymałościowych należy stosować inne sposoby technologiczne, aby uniknąć obróbki cieplnej.

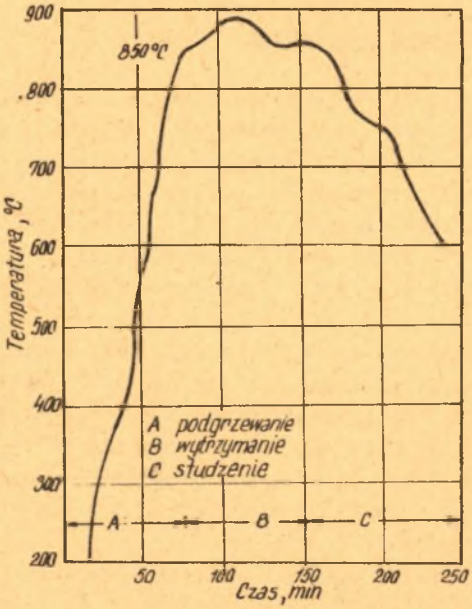
Z rys. 11 [4] wynika, że tylko dla temperatury wyżarzania 900°C w czasie dłuższym od 60 minut uzyskuje się poniżej 5% nierozłożonego cementytu.

Zalecenia autorów co do parametrów wyżarzania grafityzującego odlewów o znacznym stopniu zabielenia różnią się; Dubinin [4] proponuje stosować temperaturę 900 - 950°C i czasy 0,5 - 5 godzin - w zależności od wymiarów odlewów, zaś Petriczenko [5] proponuje temperatury żarzenia 850-900°C z równoczesną normalizacją.

Natomiast profilaktyczne wyżarzanie niedużych odlewów dla likwidacji przypadkowych wtrąceń cementytu można przeprowadzić przez stopniowe nagrzanie do temperatury 850°C w czasie 50 minut, wytrzymanie w tej tempe-



Rys. 11. Wpływ czasu wytrzymania próbek o różnych grubościach ścianek przy temperaturze 800°C (linia ciągła) i przy temperaturze 900°C (linia przerywana) na ilość nierozłożonego cementytu [4]: 1-0 min, 2-10 min, 3-30 min, 4-60 min, 5-120 min, 6-180 min.



Rys. 12. Schemat obróbki cieplnej odlewów wykonanych sposobem Eatona [31]

raturze około 20 minut, po ochłodzeniu z piecem do temperatury 450°C. Dalsze chłodzenie może odbywać się na powietrzu [4].

Parametry obróbki cieplnej żeliwnych odlewów kokilowych w zależności od wyjściowej struktury osnowy i od struktury żądanej podaje Górny i in. [6] za autorami radzieckimi.

Wyżarzenia drobnych zabielonych odlewów, wykonanych sposobem Eatona, opisują między innymi Januszewicz [30], Francis [31] i Clark [32]. Na rys. 12 pokazano przykładowo schemat takiej obróbki, która powoduje, że żeliwo staje się całkowicie ferrytyczne. Twardość tego żeliwa wynosi około 170 - - 210 HB. Bardzo zbliżone wyniki uzyskuje się również w FSE "Tamel" w Tarnowie [7].

5. Wykresy strukturalne i nomogramy żeliwa odlewanego do kokil

Własności mechaniczne odlewów żeliwnych są uzależnione od zespołu czynników wypływających na proces kształtowania się struktury pierwotnej, a więc od składu chemicznego żeliwa, stanu ciekłego metalu przed krystalizacją, obecności domieszek, warunków chłodzenia odlewu i innych.

Wskutek złożoności tego procesu nie ma dostatecznie dokładnej teorii krystalizacji i w praktyce wykorzystuje się częściowo zależności między własnościami żeliwa a parametrami procesu technologicznego [6, 17]. Przykładem tego jest rys. 13, przedstawiający wykresy strukturalne dla różnych rodzajów żeliwa w zależności od szybkości krzepnięcia i ilości C+Si.

Dla zastosowań przemysłowych opracowano [4] wykres strukturalny żeliwa zalewanego do kokil. Wykres ten, pokazany na rys. 14, uwzględnia tylko zasadnicze czynniki mające wpływ na strukturę odlewów, a więc: skład chemiczny (sumę C i Si, ilość Mn i S), szybkość krzepnięcia i dwa przypadki sposobu chłodzenia odlewu. Szybkość krzepnięcia w zależności od sprowadzonej grubości ścianki odlewu i warunków zalewania określa się przy pomocy wykresów przedstawionych na rys. 15 i 16.

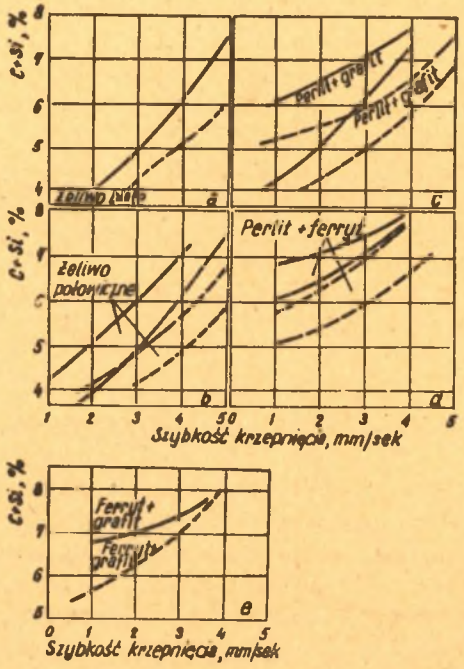
Wykres strukturalny wg Bałandina [17] [6] na rys. 17 podaje zależności pomiędzy składem chemicznym (C oraz Si), liniową szybkością krzepnięcia i względną ilością węgla związanego. Wytrzymałość na rozciąganie obliczono ze wzoru:

$$R_m = 0{,}981 \cdot 10^7 \frac{75 \cdot C_{zw} + 40}{C_{gr} + 1{,}0}, \ N/m^2$$

gdzie:

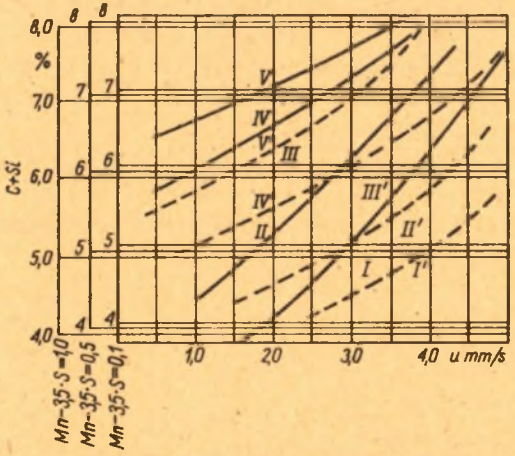
C_{zw} - % węgla związanego,

C_{gr} - % węgla w postaci grafitu.



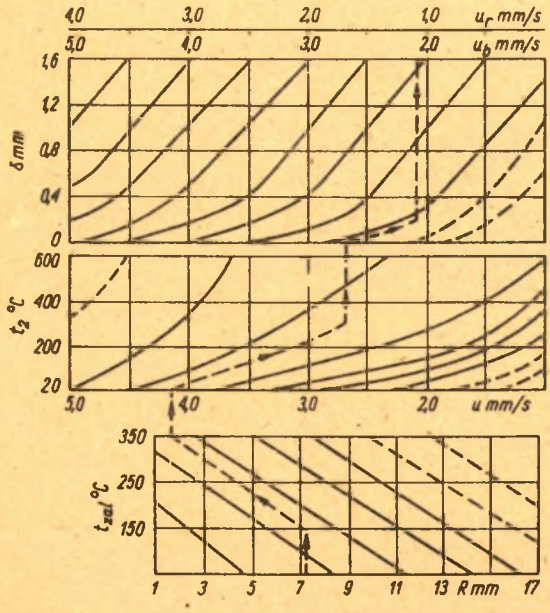
Rys. 13. Wpływ szybkości krzepnięcia i ilości C+Si w żeliwie na powstawanie różnych struktur w odlewach [4]. Linie przerywane oznaczają odlewy chłodzone na powietrzu od temperatury 950°C, linie ciągłe oznaczają odlewy chłodzone z kokilą [4]

a) żeliwo białe, b) żeliwo o strukturze: perlit + cementyt, c) żeliwo perlityczne, d) żeliwo perlityczno-ferrytyczne, e) żeliwo ferrytyczne

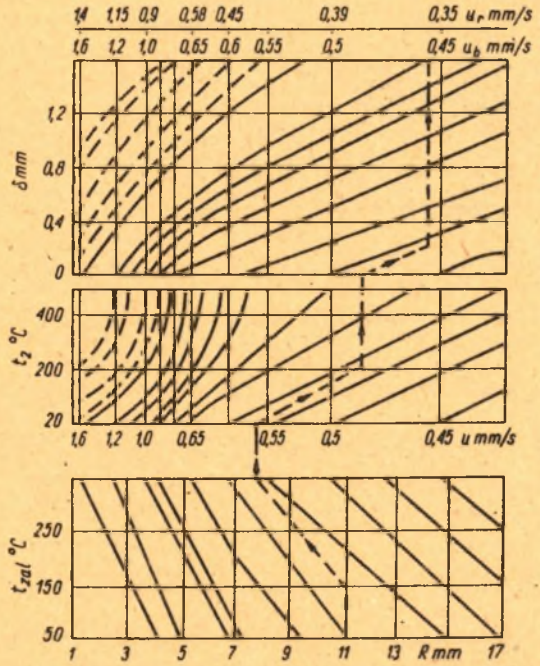


Rys. 14. Wykres strukturalny dla kokilowych odlewów żeliwnych [4, 6]. Linie ciągłe dotyczą odlewów chłodzonych w kokili, a przerywane - odlewów chłodzonych z temp. 950°C na powietrzu:

I i I' - żeliwo białe, II i II' - perlit, cementyt i grafit, III i III' - perlit i grafit, IV i IV' - perlit, ferryt i grafit, V i V' - ferryt i grafit, u - prędkość krzepnięcia

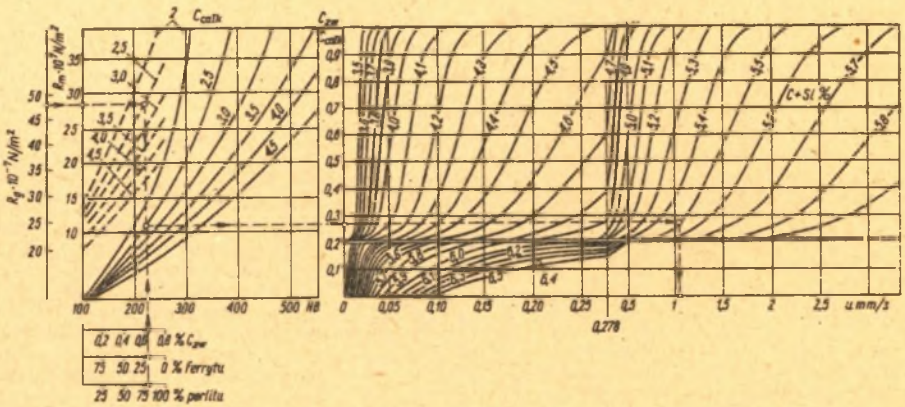


Rys. 15. Nomogram do określania prędkości krzepnięcia powierzchniowej warstwy odlewu [4-6]. Linia przerywana ze strzałkami przedstawia przykład krzepnięcia odlewu o zredukowanej grubości ścianki 7,2 mm, z żeliwa przegrzanego o 150°C, w kokili nagrzanej do 300°C i pokrytej powłoką o grubości 0,2 mm; prędkość krzepnięcia odlewu z rdzeniem piaskowym u_r = 1,2 mm/s, a bez rdzenia u_b = 2,3 mm/s, δ - grubość warstwy powłoki, R - sprowadzona grubość ścianki odlewu, t_2 - temperatura formy, t_{zal} - temperatura zalewania

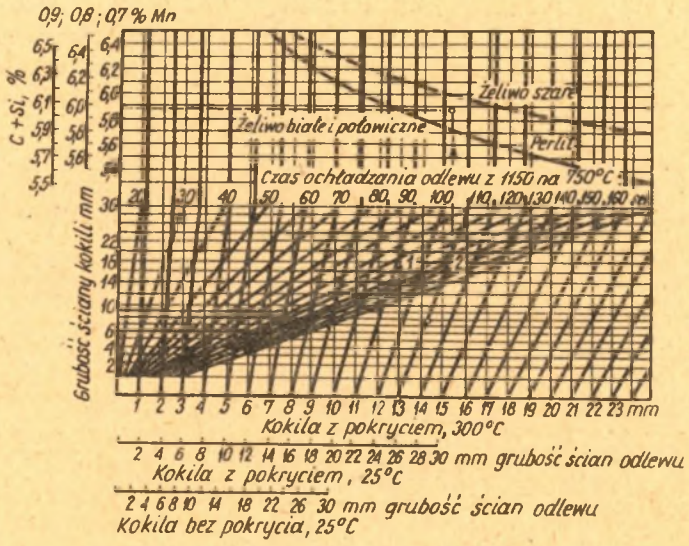


Rys. 16. Nomogram do określania średniej prędkości krzepnięcia u (także w środku odlewu) odlewów przy różnych sposobach zalewania [4-6];

u_r - prędkość krzepnięcia z rdzeniami piaskowanymi, u_b - prędkość krzepnięcia bez rdzeni, R - sprowadzona grubość ścianki odlewu



Rys. 17. Wykres strukturalny dla żeliwa [17]



Rys. 18. Nomogram technologiczny dla żeliwa odlewanego w kokili [3]

Związek między składem chemicznym żeliwa i jego własnościami mechanicznymi dla małych ilości C_{zw} wykreślony jest na podstawie danych Łandy.

Nomogram technologiczny Stiepina [3], pokazany na rys. 18, ustala związek między grubością ścianki odlewu i kokili, pokryciem węglowo-olejowym (lub bez pokrycia), temperaturą nagrzania kokili, składem chemicznym i strukturą odlewu.

Wykresy i nomogramy dla żeliwa odlewanego do kokil posiadają ograniczoną przydatność praktyczną i znacznie odbiegają od poziomu opracowań wykresów strukturalnych, np. Sippa, Collauda czy Pattersona [3].

Porównanie między sobą tych opracowań i sprawdzenie wybranego wariantu wykonania odlewu kokilowego jest bardzo utrudnione, gdyż wykresy te nie uwzględniają równocześnie tych samych czynników technologicznych. Ponadto wykresy te i nomogramy nie uwzględniają różnej intensywności oddziaływania węgla i krzemu na własności i strukturę żeliwa, operując sumą węgla i krzemu. Wiadomo jest [3, 4, 34], że mechanizm wpływu tych pierwiastków na własności i strukturę żeliwa jest odmienny, chociaż jednokierunkowy. Należy zwrócić uwagę, że np. wykres strukturalny Łandy posiada błędne założenia teoretyczne odnośnie skal porównawczych zawartości C_{zw} ferrytu i perlitu, które jest słuszne jedynie dla układu Fe-C.

Przedstawione wykresy i nomogramy nie uwzględniają również zmian struktury i własności mechanicznych spowodowanych przez obróbkę cieplną czy modyfikację żeliwa.

LITERATURA

[1] Sakwa W.: Krystalizacja, modyfikacja, powstawanie struktur odlewów oraz dobór tworzywa na odlewy. Materiały na VII Zebranie Sprawozdawcze Komitetu Hutnictwa, PAN, t. II, Krynica 1974, 89-91.

[2] Zakrzewski J., Martynowicz K.: Dalszy rozwój technologii kokilowego odlewania żeliwa. Prace Instytutu Odlewnictwa, Zeszyty Specjalne, 13, Kraków, 1973, 1-13.

[3] Sakwa W.: Żeliwo, Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1974.

[4] Dubinin N.P.: Czugunnoje litie w mietalliczeskich formach. Maszgiz, Moskwa, 1956.

[5] Petriczenko A.M.: Tieoria i tiechnołogia kokilnogo litija. Technika, Kijew 1967.

[6] Górny Z. i in.: Odlewanie kokilowe stopów żeliwa, WNT, Warszawa 1972.

[7] Dańko J., Kubala R.: Odlewnia kokilowa Fabryki Silników Elektrycznych "Tamel" w Tarnowie. Przegląd Odlewnictwa, 11/1968, 385-389.

[8] Skrocki R.R., Wallace J.F.: Control of Structure and Properties of Irons Cast in Permanent Molds. Transactions of the American Foundrymens Society, 77/1970, 297-302.

[9] Petriczenko A.M.: Osobiennosti proizwodstwa tonkostiennych kokilnych otliwok. Litejnoje Proizwodstwo, 7/1955, 4-8.

[10] Löhberg K., Schöndorf P.: Beitrag zur Frage der Herstellung von dünnwandigen Kokillenguss aus Gusseisenlegierungen. Giesserei techn. Wissen. Beihefte, 2/1965, 8-85.

[11] Kümmerle R.: Kokillenformguss aus Gusseisen. Giesserei, 21/1964, 625-630.

[12] Popow A.D.: Żeliwo na odlewy kokilowe. Przegląd Odlewnictwa 5/1953 165.

[13] Skrocki R.R., Wallace J.F.: Control of structure and Properties of Irons cast in Permanent Molds. Transactions of the American Foundrymens Society, 78/1970, 126-128.

[14] Keilitz R.: Ein Beitrag zum Werksoff "Kokillengrauguss" Giesserei technik 10/1956, 220-224.

[15] Bakovsky E.: Einfluss von Schlichten auf die Grauerstarrung, bei Kokillengrauguss. Giesserei-Technik, 12/1960, 353-358.

[16] Wlodawer R.: Der Einfluss des Moduls auf Gefügeeigenschaften von Grauguss, Internationaler Giessereikongress, Warszawa 1965.

[17] Wiejnik A.J.:Rasczlot otliwki, Maszinostrojenie, Moskwa 1964.

[18] Tomovic M., Cikara D.: Liwarstwo, 17/1970, 161.

[19] Wittekopf D.: Wpływ zmiany grubości ścianki, temperatury kokili i czasu przebywania w niej odlewu na strukturę i na własności wytrzymałościowe żeliwa. Przegląd Odlewnictwa 3/1965, 87-88.

[20] Kolesniczenko A.G.: Struktura powierchnostnych słojew kokilnych czugunnych otliwok. Litejnoje Proizwodstwo, 2/1961, 20-21.

[21] Zakrzewski J.: Ustalenie technologicznych parametrów kokilowego odlewania żeliwa. Przegląd Odlewnictwa, 10/1969, 334-338.

[22] Ishikawa K., Tsunoda E.: Influences of Melting and Pouring Temperatures upon Chilling Tendency of Permanent Mold Cast Iron.The Journal of the Japan Foundrymen's Society, 42/1970, 605-609.

[23] Białobrzeski A., Zakrzewski J.: Kokilowe odlewanie stopów żelaza. Przegląd Odlewnictwa, 4/1971.

[24] Komissarow V.A.: Regulirowanie struktury czugunnych kokilnych otliwok. Litejnoje Proizwodstwo, 10/1969, 21-22.

[25] Kobelew N.I. i in.: Wybór sostawa i kontrol kaczestwa czuguna dla kokilnych otliwok.Litejnoje Proizwodstwo, 10/1969, 10-13.

[26] Kobelew N.I. i in.: Modificirowanie i legirowanie sierowo czuguna pri litie w kokil. Litejnoje Proizwodstwo, 8/1970, 13-14.

[27] Zuithoff A.I. i in.: Die Wanddickenabhängigkeit von Gusseisenkokillenguss, Internationaler Giessereikongress Düsseldorf 1971.

[28] Igualador A.: Colada en coguilla del hierro fundido. Fundicion, 18/1971, 25-42.

[29] Frye G.: Permanent Mold Process As Applied To Production of Gray Iron Castings. Modern. Castings, 54/1968, 52-55.

[30] Januszewicz P.: Produkcja odlewów żeliwnych w formach metalowych w Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. Przegląd Odlewnictwa, 7-8/ /1960, 221-225.

[31] Francis J.L.: Gravity-die-casting cast Iron. Foundry Trade Journal, 118/1965, 443-446.

[32] Clark D. i in.: Permanent Molding Aluminium and Gray Iron Castings at Forest City Foundries. Modern Castings 54/IV/1968, 65-67.

[33] Drabina J.: Odlewanie kokilowe w odlewni żeliwa "Skoczów". Przegląd Odlewnictwa, 1/1972, 30-31.

[34] Podrzucki Cz., Kalata Cz.: Metalurgia i odlewnictwo żeliwa, Wyd. "Śląsk", Katowice, 1976.

[35] Wiejnik A.I.:Osnowy teplowoj teorii litija. Sb. "Woprosy teorii litejnych processow" Maszgiz, Moskwa 1960.

[36] Dubinin N.P. i inni: Kokilnoje Litie. Sprawoczne posobie. Izd. Maszinostroenie, Moskwa 1967.

[37] Sakwa W., Gawroński J., Sokołowski J.: Dobór optymalnych parametrów odlewania kokilowego żeliwa szarego. Materiały na VII Zebranie Sprawozdawcze Komitetu Hutnictwa PAN, t. II/1974, 111-124.

[38] Gawroński J., Łabęcki M., Sokołowski J.: Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na własności mechaniczne i technologiczne żeliwa szarego odlewanego do kokil. Wybrane zagadnienia z odlewnictwa, Instytut Odlewnictwa Politechniki Śląskiej i STOP Gliwice 1972.

[39] Gawroński J., Łabęcki M., Sokołowski J.: Wpływ składu chemicznego i grubości ścianki na własności odlewów wykonanych w kokilach. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Mechanika 48/1973, 45-60.

[40] Gawroński J., Łabęcki M., Sokołowski J.: Wpływ składu chemicznego i obróbki cieplnej na własności mechaniczne i technologiczne żeliwa szarego odlewanego do kokil. Prace Instytutu Odlewnictwa MPC-Kraków, Zeszyty specjalne, 14/1973, 1-19.

[41] Gawroński J., Łabęcki M., Sokołowski J.: Analiza parametrów odlewania kokilowego żeliwa szarego. Prace Instytutu Odlewnictwa MPC-Kraków, Zeszyty specjalne, 17/1974, 43-58.

[42] Sokołowski J.: Praca doktorska, Gliwice 1974.

[43] Kondo Y. i in.: Chill Casting Grey Iron. Imono t. 45 6/1973, s. 517.

[44] P.W.Czernogorow, Izossimow A.W.: Progressiwnije mietody izgotowlenia otliwok, Maszgiz 1965.

[45] Parent Simoni S., Parisien J.: Coulée en coquille des fontes. Fonderie, 1974, 71.

[46] Szreniawski J., Pietrowski S.: Struktura i właściwości mechaniczne niskostopowego żeliwa aluminiowego odlewanego do kokil. Przegląd Odlewnictwa, 1975.

ОБЗОР МИРОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ В ОБЛАСТИ СЕРОГО ЧУГУНА ОТЛИВАЕМОГО С МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ФОРМЫ

Р е з ю м е

Описывается влияние самых существенных факторов на структуру и механические свойства, достижения в области термообработки и настоящее состояние структурных диаграмм и номограмм кокильного серого чугуна.

A SURVEY OF WORLD INVESTIGATIONS ON GREY CAST IRON CAST INTO METAL MOULDS

S u m m a r y

There has been discussed the influence of the most essential factors on the structure and mechanical properties of grey cast iron cast into metal moulds, the achievements in the heat treatment as well as the recent state of structural diagrams and the nomograms of drill grey cast.