ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1978

Seria: Mechanika z. 62 Nr kol. 530

Jerzy KILARSKI, Józef SUCHY

# WPŁYW SZYBKOŚCI CHŁODZENIA ŻELIW CHROMOWYCH NA RODZAJ STRUKTURY W ZALEŻNOŚCI OD WYMIARÓW ODLEWU

Streszczenie. Przedstawiono wykresy przemian austenitu podczas chłodzenia ciągłego żeliw o zawartości 14, 18 i 24% chromu. Dla celów praktycznych krzywe chłodzenia na wykresach odnoszono do procesu chłodzenia na powietrzu walca nieskończonego o określonej średnicy. Pozwala to na dobór odpowiedniego składu żeliwa przeznaczonego na elementy maszyn narażone na intensywne zużycie ścierne i określa rodzaj oraz celowość ich obróbki cieplnej.

## 1. Wstęp

Problem odporności na ścieranie elementów maszyn interesuje nie tylko użytkowników (Przemysł Energetyczny, Górnictwo, Przeróbka Kopalin, Cementownie itp.), ale również odlewników, metalurgów i metaloznawców.

Spośród szeregu materiałów odpornych na ścieranie czołową pozycję zajmują żeliwa wysokochromowe (13-30% Cr). Ich dobra odporność na ścieranie związana jest z wysoką twardością i dyspersyjnym umocnieniem węglikami typu $(Fe, Cr)_7C_3$ o mikrotwardości 1300-1800 $\mu$HV.

Jakkolwiek twardość, która przez długie lata była utożsamiana z odpornością na ścieranie, nie może być miernikiem tej własności, to jednak odlewy z żeliwa chromowego powinny charakteryzować się twardością powyżej 500 HV [1-2].

Dotychczasowe badania pozwoliły w pewnym stopniu na określenie cech charakteryzujących żeliwa chromowe jako materiały odporne na ścieranie. Ujmuje to (chociaż jeszcze w sposób dość ogólny) poniższy wzór, wyznaczony na podstawie wcześniejszych badań [2]:

$$\ln(Z) = 9{,}25 - 0{,}001\ HV - 0{,}002\ H_f - 0{,}002\ H_w - 0{,}026\ P - 0{,}06\ S,$$

gdzie:

Z - zużycie ścierne ($10^{-3}$ $mm^3$),

HV - twardość Vickersa ($kG/mm^2$),

$H_f$ - mikrotwardość osnowy,

$H_w$ - mikrotwardość węglików,

P - udział objętościowy węglików w %,

S - rodzaj struktury zakodowanej liczbowo, a określający dyspersyjność węglików.

Ze wzoru wynika (porównując wielkości współczynników regresji), że najbardziej istotny wpływ na obniżenie zużycia ściernego żeliw wysokochromowych wywiera duża ilość drobnych węglików o wysokiej mikrotwardości równomiernie rozłożonych w odpowiednio twardej osnowie. Taką strukturę uzyskać można przez dobór odpowiedniego składu chemicznego żeliwa oraz na drodze obróbki cieplnej.

Zagadnieniu obróbki cieplnej żeliw wysokochromowych poświęcony jest niniejszy artykuł. W celu uzyskania odpowiednich informacji na ten temat wykonano dla wybranych gatunków wykresy CTPo. Ponieważ interpretacja tych wykresów jest łatwiejsza, gdy posiadamy informacje, jaką szybkość chłodzenia osiąga odlew o określonych wymiarach (a tym samym przez jakie zakresy przemian przejdzie), zaproponowano tutaj metodę odnoszenia krzywych dylatometrycznych do odpowiednich krzywych studzenia dla odlewu, o określonym kształcie i wymiarach, chłodzonego na powietrzu.

## 2. Metodyka i zakres badań własnych

Przyjęte do badań żeliwa różniły się zawartością chromu, wynoszącą 14, 18 i 24% oraz stosunkiem Cr/C. Wielkość Cr/C uznawana jest w literaturze jako istotny czynnik określający wpływ składu chemicznego na strukturę i własności stopu. Wytopy przeprowadzono w piecu indukcyjnym średniej częstotliwości i o pojemności tygla 30 kg. Odlane próbki przygotowano do badań dylatometrycznych. Badania te prowadzono na dylatometrze optycznym LS-4, rejestrując na kliszy fotograficznej przebieg chłodzenia próbek o średnicy 9 mm z różnymi szybkościami. Skład chemiczny rozpatrywanych żeliw chromowych przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

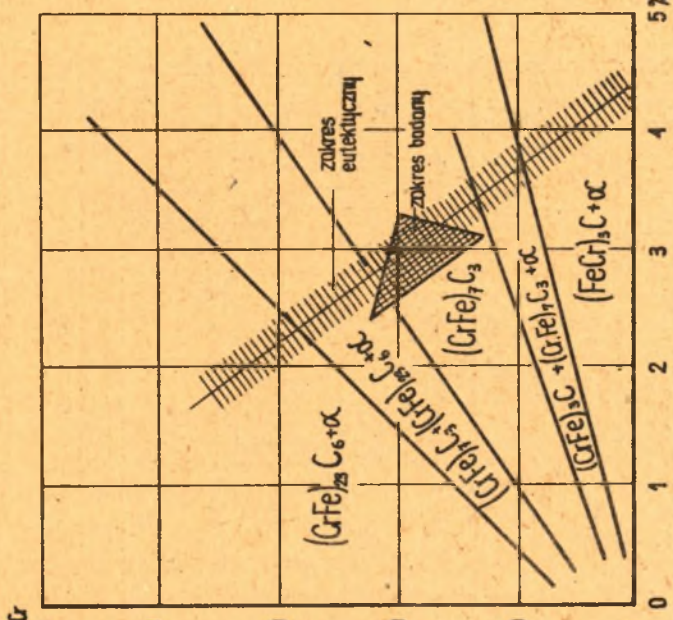
Skład chemiczny żeliw wysokochromowych

| Nr wytopu | Skład chemiczny w % | | | | | | | Cr/C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | C | Si | Mn | Cr | Ni | S | P | |
| A | 3,04 | 0,88 | 1,19 | 13,75 | - | 0,012 | 0,04 | 4,5 |
| B | 3,27 | 1,32 | 1,11 | 18,50 | - | 0,034 | 0,048 | 5,65 |
| C | 2,57 | 0,70 | 1,20 | 24,07 | 0,45 | 0,02 | 0,055 | 9,3 |

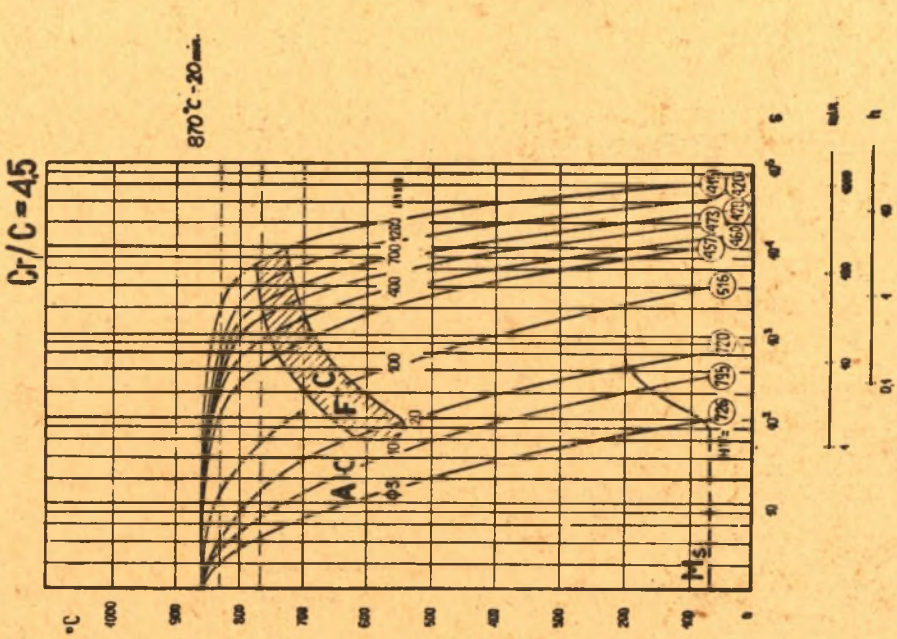
Badany zakres żeliw przedstawiono na rysunku 1.

Badania dylatometryczne uzupełniono pomiarami twardości.

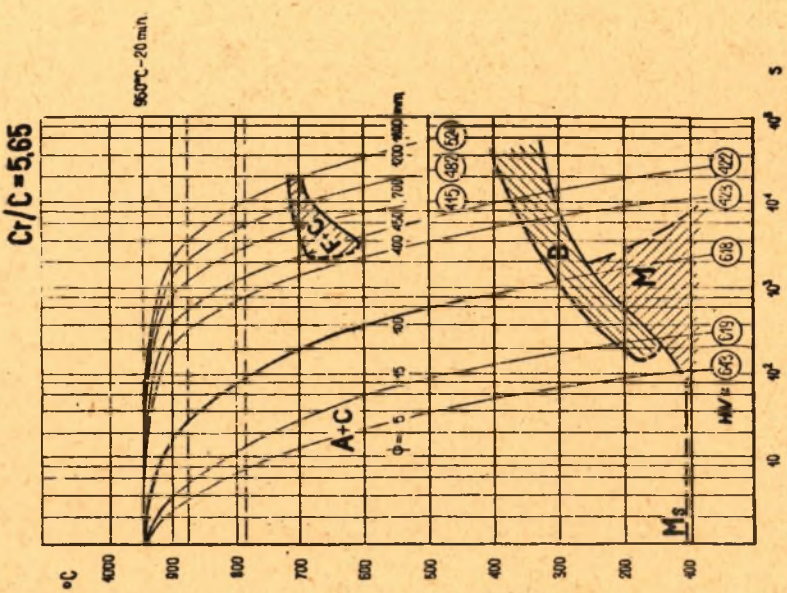
Opracowane wykresy przemian austenitu podczas chłodzenia ciągłego żeliw chromowych przedstawiono na rysunkach 2, 3, 4.



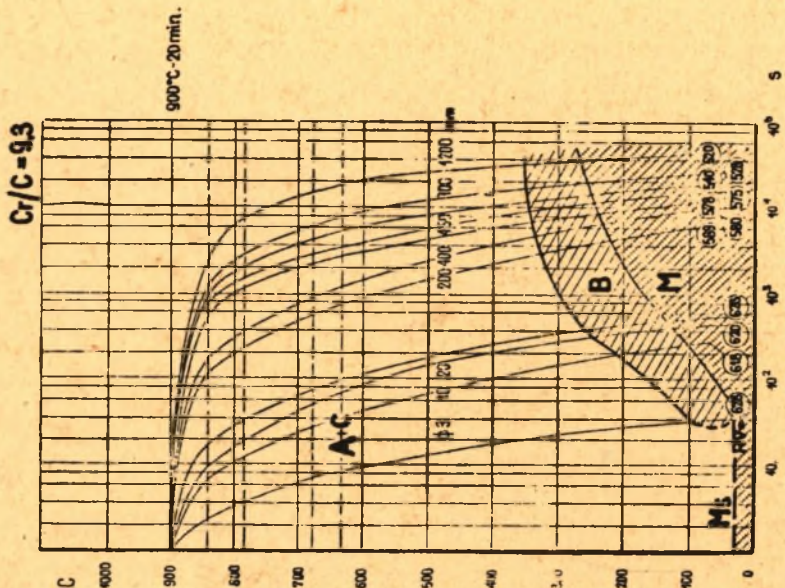

Rys. 1. Granice występowania faz w stopach Fe-Cr-C [6]




Rys. 2. Wykres CTP dla żeliwa o zawartości 13,75% Cr i 3,04% C




Rys. 3. Wykres $CTP_c$ dla żeliwa o zawartości 18,5% Cr i 3,27% C




Rys. 4. Wykres $CTP_c$ dla żeliwa o zawartości 24,07% Cr i 2,57% C

Następnie w oparciu o zależności matematyczne znaleziono krzywe studzenia na powietrzu walca nieskończonego o tak dobranej średnicy, że przebieg krzywej odpowiada w przybliżeniu krzywej dylatometrycznej walca o określonej średnicy stygnącego w różnych ośrodkach. Obliczenia te przeprowadzono na minikomputerze WANG 2200.

## 3. Krzywe chłodzenia

Uzyskane drogą badań dylatometrycznych krzywe obrazują przebieg chłodzenia próbki o określonej średnicy stygnącej z różnymi szybkościami, co realizowane jest przez studzenie w różnych ośrodkach (woda, powietrze, piec, mufla) lub przy pomocy programów (300-45 K/h).

Dla praktyki odlewniczej bardziej korzystną byłaby znajomość przebiegu krzywych chłodzenia odlewu w jakimś określonym ośrodku, np. na powietrzu, w zależności od zmiany wymiaru charakterystycznego odlewu. Dla uzyskania takich krzywych, które jednocześnie byłyby zbliżone swoim przebiegiem do krzywych dylatometrycznych posłużono się pewnymi zależnościami matematycznymi (1, 2).

Dla uproszczenia przyjęto, że stygnący odlew można uznać za ciało klasyczne, tzn. płytę nieskończenie długą i szeroką, walec nieskończenie długi lub kulę. Rozwiązaniem zagadnienia są tutaj funkcje opisujące zależności temperatury ciała od parametrów procesu [4]

$$T_x = f(x, \tau, T_o, T_{ot}, X, c, \lambda, \alpha, \varrho)$$

Korzystając z prawa podobieństwa możemy przejść do równania kryterialnego:

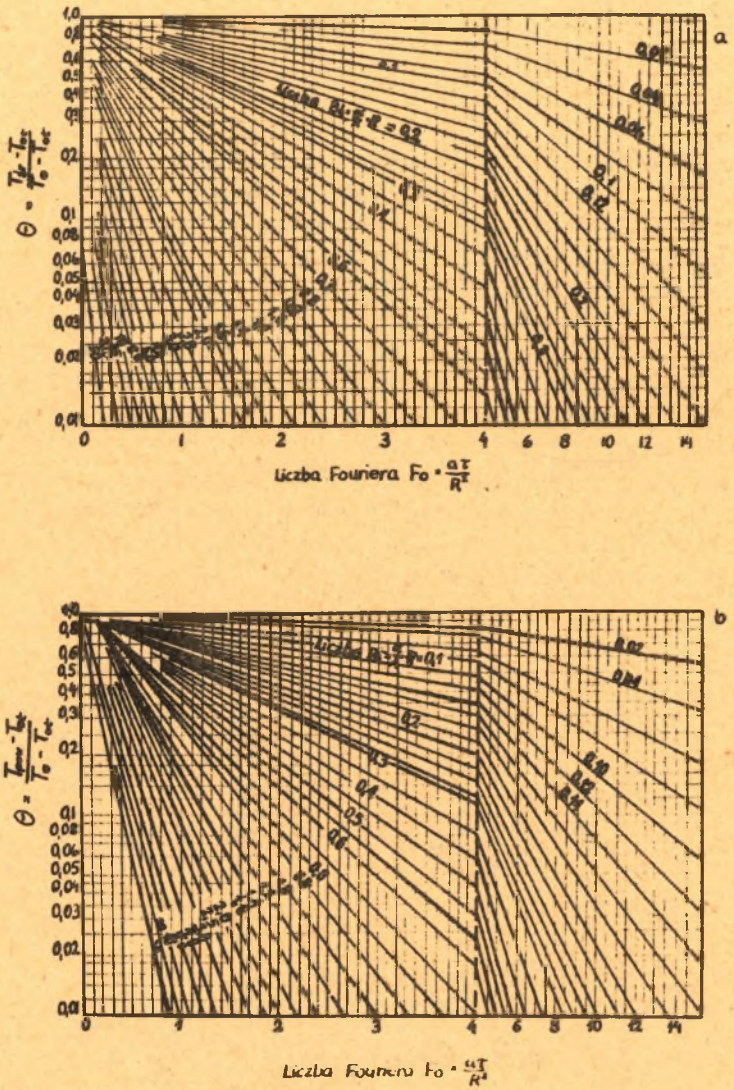
$$\theta = \frac{T_x - T_{ot}}{T_o - T_{ot}} = f_1(Fo, Bi, \frac{x}{X}) \qquad (1)$$

gdzie:

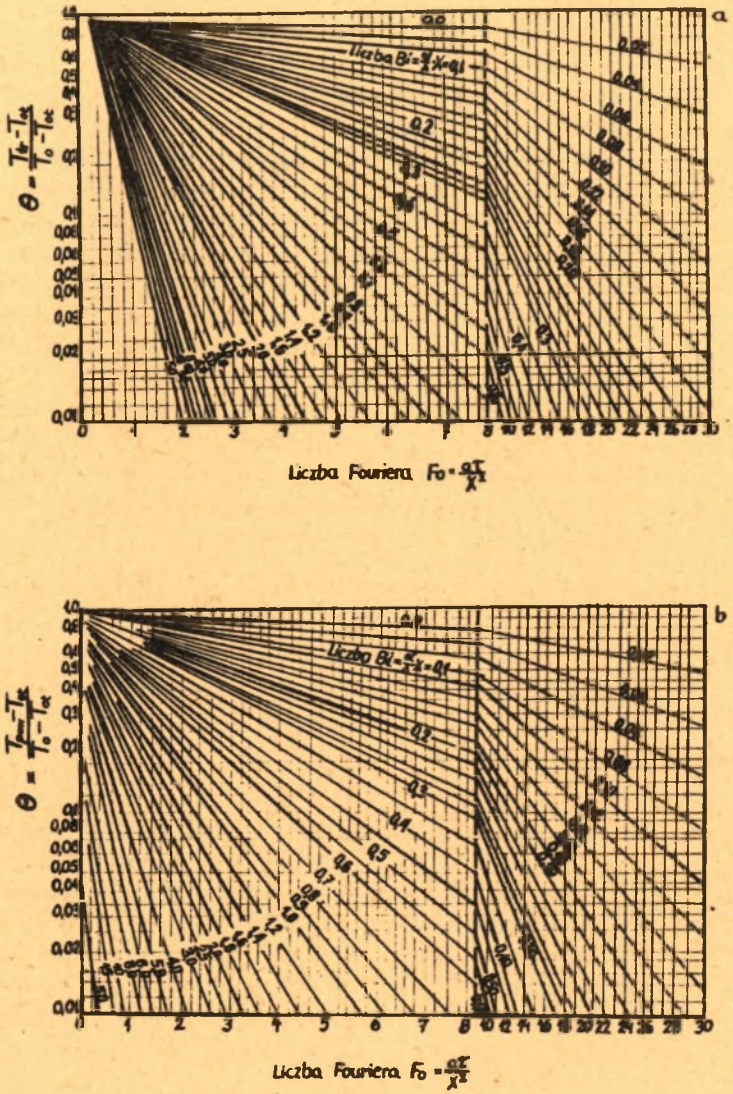
$$Fo = \frac{a\tau}{X^2} \quad \text{kryterium Fouriera} \qquad (2)$$

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} X \quad \text{kryterium Biota,} \qquad (3)$$

x - odległość od powierzchni ciała,
a - współczynnik przewodzenia temperatury,
$\lambda$ - współczynnik przewodzenia ciepła,
$\tau$ - czas,




Rys. 5. Wykresy do obliczenia względnej temperatury nieskończenie długiego walca (przy warunkach brzegowych trzeciego rodzaju)
a) oś, b) - powierzchnia, $T_{śr}$ - temperatura osi walca, $T_{pow}$ - temperatura powierzchni walca, R - promień walca




Rys. 6. Wykresy do obliczenia względnej temperatury nieograniczonej płyty (warunki brzegowe trzeciego rodzaju)

a) - płaszczyzna środkowa, b) - powierzchnia, $T_{śr}$ - temperatura środkowej płaszczyzny, $T_{pow}$ - temperatura powierzchni

$\alpha$ - współczynnik oddawania ciepła od odlewu,

X - wymiar charakterystyczny ciała, tj. połowa grubości płyty, promień walca lub promień kuli.

Dla praktyki opracowane są dla różnych ciał klasycznych i temperatury środka lub powierzchni ciała wykresy zależności od Fo oraz Bi (rys. 5 i 6) [3].

W celu wyznaczenia krzywych odpowiadających stygnięciu walca nieskończonego o zmiennej średnicy, chłodzonego na powietrzu, należało przyjąć w pewnym zakresie temperatur średnią wartość współczynnika oddawania ciepła od odlewu. Przeprowadzono to na drodze doświadczalnej, rejestrując w warunkach typowych dla odlewni przebieg zmiany temperatury osi walca o średnicy 30 mm studzonego na powietrzu o temperaturze 28°C. Z krzywej chłodzenia wybrano zakres 700 - 400°C, który będzie również zakresem obliczeniowym dla pozostałych krzywych. Przyjęto bowiem założenie, że jeżeli wyznaczona krzywa odpowiadać będzie w tym przedziale krzywej dylatometrycznej, to jest ona określona z wystarczającą dokładnością na całej długości. Operując wykresami przedstawionymi na rys. 5, 6 obliczono średnią wartość współczynnika $\alpha$ = 112 W/m$^2$ K. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla badanych żeliw przyjęto w badanym zakresie temperatur $\lambda_{śr}$ = = 45 W/m K. Z tej wielkości wyliczono współczynnik przewodzenia temperatury na podstawie zależności:

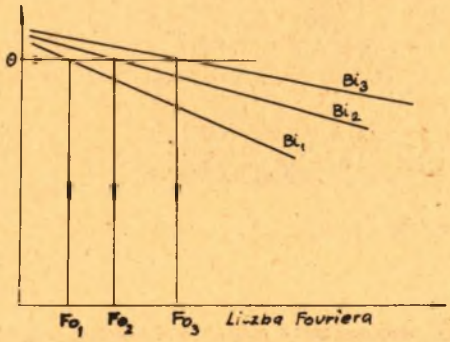
$$a = \frac{\lambda}{c\rho},$$

gdzie:

c - ciepło właściwe,

$\rho$ - gęstość.

Uzyskano wartość a = 0,036 m$^2$/h.




Rys. 7. Schemat korzystania z wykresów Iwancowa

Podstawiając te wartości do równania (1) i posługując się wykresami przedstawionymi na rys. 5 i 6 uzyskujemy szereg wartości $Fo_{1,2...n}$, które porównujemy z wartościami Fo uzyskanymi drogą obliczeniową z porównania wzorów (2) i (3)

$$Fo_{obl.} = \frac{a\tau\alpha^2}{\lambda^2 Bi^2},$$

gdzie wartość $\tau$ określona jest na podstawie krzywej dylatometrycznej.

Schemat posługiwania się wykresem przedstawia rys. 7.

Doprowadzając do zgodności (z założonym błędem) wartości Fo z wykresu i Fo obliczeniowego, uzyskamy z zależności (3) szukany wymiar charakterystyczny odlewu. Jeżeli np. przyjąć dowolną szybkość v, dla przykładu 150 K/h, wtedy przyjmując Bi = 10, x = 4, oraz wartość Fo z wykresu =0,12 a Fo uzyskana drogą obliczeniową =0,005. Ponieważ między tymi wartościami występuje duża rozbieżność, przyjmujemy następne przybliżenia. I tak dla Bi = 1,8 mamy x = 0,72, natomiast $Fo_{z\ wykr.}$ = 0,2; $Fo_{obl.}$ = 0,06; dla Bi = 1,0; x = 0,4; $Fo_{z\ wykr.}$ = 0,25; $Fo_{obl.}$ = 0,23. Z tego wynika, że dla określonej szybkości studzenia (dla podanego przykładu V = 150°/h i założony błąd porównania wartości Fo równy 0,05) wymiar charakterystyczny próbki wynosi 0,4 m. Tą metodą obliczono średnicę próbek walcowych odpowiadających szeregowi szybkości chłodzenia o przebiegu zbliżonym do krzywych chłodzenia w różnych ośrodkach. Przykładowo dla stopu B wartości te zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2

Obliczone średnice próbek walcowych odpowiadających szybkości chłodzenia w różnych ośrodkach

| Nr krzywej | Odpowiadająca krzywa chłodzenia walca Ø 9 mm w dylatometrze | Szybkość chłodzenia wg dylatogramu | Obliczona wartość Ø mm |
|---|---|---|---|
| 1 | chłodzenie w wodzie | 51500°/h | 5 |
| 2 | chłodzenie w mufli kwarcowej | 12300 " | 16 |
| 3 | chłodzenie w mufli metalowej | 1800 " | 98 |
| 4 | chłodzenie z dużym piecem | 372 " | 400 |
| 5 | chłodzenie wg programu | 300 " | 440 |
| 6 | " " | 150 " | 720 |
| 7 | " " | 90 " | 1200 |
| 8 | " " | 45 " | 1760 |

Dla ułatwienia dosyć uciążliwych obliczeń przeprowadzono je na minikomputerze WANG. W celu ułożenia programu wprowadzono następujące oznaczenia:

$T_{śr}$ = S, $T_{ot}$ = C, $T_o$ = Z, $\tau$ = T, V/K/h/ = V, Bi = B, Fo = F, $\theta$ = D

Przyjęto następujący program:

```
10  REM  STYGNIĘCIE WALCA
20  S=400
30  C=20
40  Z=700
50  INPUT  "PODAJ V",V
60  IF V>10000 THEN 190
```

```
 70  IF V=0 THEN 210
 80  T=(Z-S)  /V
 90  D=(S-C)  /(Z-C)
100  PRINT "TETA"=",D
110  PRINT "H"=",H
120  INPUT "PODAJ B,F",B,F
130  H=0.225*T/B↑2
140  IF ABS (F-H)<0.05 THEN 160
150  GOTO 110
160  R=B/2.5
170  PRINT "PROMIEŃ WALCA=",R
180  GOTO 50
190  PRINT "POZA WYKRESEM"
200  GOTO 50
210  END
```

Przy kroku 120 wartość kryterium Bi i Fo podajemy korzystając z wykresów na rys. 5 i 6. Podobnie przeprowadzono obliczenia dla stopów A i C. Uzyskane wartości naniesiono na wykresy $CTP_c$.

W celu zorientowania się, jaka struktura będzie efektem studzenia odlewu w kształcie płyty o określonej grubości w masie formierskiej, co jest niezwykle istotne z punktu widzenia praktyki odlewniczej, postanowiono poszukać takiego analogu do krzywych chłodzenia w dylatometrze. Średnią wartość współczynnika wnikania ciepła do formy określono na podstawie zależności (4):

$$\alpha_2 = b_2 \left[ \pi (\tau - \tau_o) \right]^{\frac{1}{2}}$$

gdzie:

$b_2$ - współczynnik akumulacji ciepła [5],

$\tau$ - czas od chwili zalania,

$\tau_o$ - czas ruchu metalu od wlewu doprowadzającego do danego przekroju formy.

Posługując się tą zależnością według metody opisanej poprzednio przeprowadzono obliczenia dla szybkości chłodzenia 45 K/h. Zakres wykresów Iwancowa [3] okazał się tutaj niewystarczający. Można jedynie stwierdzić, że grubość płyty stygnącej w formie piaskowo-iłowej z tą samą szybkością jest mniejsza od 245 mm. Potwierdzeniem tego jest struktura próbki o średnicy 10 mm stygnącej w formie (stan surowy odlewu), która odpowiada strukturze próbki o średnicy 9 mm chłodzonej z szybkością 45 K/h.

## 4. Analiza badań

Badane żeliwa chromowe o zawartości 14, 18 i 24% chromu i 2,5 - 3,3% węgla nie posiadają stabilnej struktury ferrytycznej w całym zakresie temperatur. Powyżej 850°C występuje w tych żeliwach zakres jednofazowy austenitu, umożliwiający hartowanie na martenzyt. Chrom i węgiel, rozpuszczone w austenicie stabilizują go, dzięki czemu żeliwa te mają dużą hartowność i można hartować je w powietrzu.

Hartowania w wodzie odlewów wykonanych z tych żeliw praktycznie nie stosuje się. Stopy te charakteryzują się małą przewodnością cieplną, co przy dużych szybkościach chłodzenia powoduje wzrost naprężeń hartowniczych i prowadzi do zniszczenia odlewu. Dlatego rozpatrując otrzymane wykresy $CTP_c$ będziemy rozważali praktyczne przedziały przemian podczas chłodzenia z mniejszymi szybkościami.

Żeliwa zawierające 14% Cr mają wykresy $CTP_c$ przedstawione na rys. 2. Charakterystyczną cechą tego wykresu jest brak zakresu przemiany bainitycznej. Natomiast może wystąpić przemiana martenzytyczna lub perlityczna, które poprzedza wydzielenie się węglików z austenitu.

Najmniejszą szybkość, przy której uzyskuje się strukturę martenzytyczną (albo martenzytyczną z pewną ilością austenitu szczątkowego), nazywamy prędkością krytyczną. Warunek ten spełnia dla tych żeliw chłodzenie w powietrzu walców o średnicy poniżej 10 mm. Jednak jak widać z rysunku, brak jest końca przemiany martenzytycznej Mf, która leży poniżej temperatury otoczenia, w wyniku czego oprócz martenzytu pojawi się austenit szczątkowy. Twardość tej struktury waha się w granicach 720-795 HV. Jeżeli zastosuje się mniejsze szybkości chłodzenia od krytycznych, wówczas z przechłodzonego austenitu wydzieli się ferryt. W tym czasie lub nieco później zaczyna się rozkład pozostałego austenitu w perlit.

Na skutek opisanego przebiegu chłodzenia powstaje nowa struktura ferrytyczno-perlityczna z węglikami. Twardość tej struktury waha się w granicach 420-480 HV.

Dla celów praktycznych można przyjąć, że żeliwa o zawartości około 14% Cr i 3% C, odlane w kształcie walca o średnicy mniejszej lub równej 10 mm po hartowaniu w powietrzu mogą uzyskać strukturę martenzytyczną lub martenzytyczną z austenitem szczątkowym.

Korzystając z pojęcia sprowadzonej grubości ścianki możemy stąd określić graniczne wymiary rzeczywistych odlewów hartowanych w powietrzu, którym zapewnimy strukturę martenzytyczną.

Żeliwa zawierające 18% Cr mają wykresy $CTP_c$ przedstawione na rys. 3. Cechą tych wykresów jest występowanie przemiany perlitycznej, bainitycznej i martenzytycznej. Jednak dla celów praktycznych można przyjąć, że szybkości chłodzenia występujące podczas obróbki cieplnej odlewów zapewniają jedynie strukturę martenzytyczno-bainityczną lub perlityczno-bainityczną oraz ferrytyczną z węglikami. Odlewy z tego żeliwa o strukturze

ferrytyczno-bainitycznej mają twardość w granicach 415-480 HV. Natomiast przy strukturze martenzytyczno-bainitycznej twardość wzrasta do około 620 HV, a więc niewiele wyżej od stanu surowego odlewu (548 HV), wobec czego stosowanie hartowania w powietrzu dla żeliw o zawartości około 18% Cr i 3,3% C jest problematyczne.

Przykładowo wykres $CTP_c$ dla żeliwa zawierającego około 24% Cr przedstawiono na rys. 4. Charakterystyczną cechą tego wykresu jest brak występowania zakresu przemiany perlitycznej. Tak silne przesunięcie zakresu tej przemiany spowodowane jest nie tylko dużą zawartością chromu ale również obecnością niklu. Dla celów praktycznych można przyjąć, że struktura tych żeliw po dowolnej obróbce cieplnej (hartowanie w dowolnym ośrodku) składa się z bainitu, martenzytu i austenitu szczątkowego. Twardość jej waha się w granicach 528-628 HV. Struktury czysto martenzytycznej nawet przy bardzo dużych szybkościach chłodzenia praktycznie nie można uzyskać. Dlatego też dla tego rodzaju żeliw chromowych hartowanie w powietrzu, zmierzające do podwyższenia twardości, jest całkowicie niecelowe.

Reasumując przedstawione wykresy można zaobserwować, że wzrost zawartości chromu od 13-24% powoduje wyraźne przesunięcie w prawo zakresu przemiany perlitycznej, aż do prawie całkowitego zaniku. Natomiast zakres występowania bainitu w miarę wzrostu chromu rozszerza się w lewo i obejmuje cały zakres badanych szybkości chłodzenia.

Uzyskane wyniki potwierdzają ponadto słuszność stosowanie stosunku Cr/C jako wyznacznika wpływu składu chemicznego na strukturę i własności badanych żeliw.

Można także stwierdzić, że dla praktyki celowym wydaje się wprowadzenie do wykresów CTPc modyfikacji przedstawienia krzywych chłodzenia. W tym celu wykorzystać można przedstawioną w pracy metodę obliczeń.

LITERATURA

[1] Sakwa W.: Żeliwo stopowe, ZPWO-STOP, Kraków 1973.

[2] Kilarski J.: Praca doktorska, Pol. Śl. Gliwice 1975.

[3] Iwancow P.G.: Nagrzewanie metali. Teoria i metody obliczeń, Moskwa 1958.

[4] Longa W.: Krzepnięcie odlewów w formach piaskowych, "Śląsk", Katowice 1973.

[5] Sakwa W., Wachelko T.: Teoria i praktyka technologii materiałów formierskich, "Śląsk", Katowice 1972.

[6] Henke T.: Chrom im Sondergusseisen, Giesserei-Praxis 1968, 23, s.471.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ХРОМИСТОГО ЧУГУНА
НА ТИП СТРУКТУРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗМЕРОВ ОТЛИВКИ

Р е з ю м е

Даются диаграммы аустенитных превращений во время непрерывного охлаждения чугуна содержащего 14, 18 и 24% хрома. Для практических целей кривые охлаждения на диаграммах сводились к процессу охлаждения на воздухе неограниченно длинного цилиндра определённого диаметра. Этот способ даёт возможность подобрать соответствующий состав чугуна предназначенного для детелей машин подвергаемых интенсивному износу и определяет целесообразность их термообработки.

THE INFLUENCE OF CHROMIUM CAST IRON COOLING SPEED ON THE STRUCTURE
TYPE ACCORDING TO THE CASTING DIMENSIONS

S u m m a r y

There have been presented the diagrams of austenite changes throughout the continuous cooling of cast iron containing 14, 18 and 24% chromium. For the practical purposes the cooling curves on the diagrams are related to the process of cooling in the air an infinite cylinder with a definite diameter. It allows to choose the appropriate contens of cast iron used for the machine elements exposed to intensive abrasive wear and determines the kind and the purposfulness of their heat treatment.