

Stanisław Jura, Antoni Sznirch

WPŁYW PARAMETRÓW PROCESU KRYSZALIZACJI ŻELIWA NADEUTEKTYCZNEGO NA WŁASNOŚCI MECHANICZNE I ZABIELENIE

1. Wprowadzenie

Analiza termiczna i deriwacyjna, polegająca na równoczesnej rejestracji krzywej stygnięcia $T = f(t)$ oraz jej pierwszej pochodnej $dT/dt = f'(t)$, jest zmodernizowaną i rozszerzoną formą powszechnie znanej analizy termicznej [6, 7, 8]. Prowadzone dotychczas badania obejmowały wyłącznie grupę żeliw podeutektycznych. Podjęto próbę zastosowania metody ATD dla żeliw nadeutektycznych.

Automatyzacja procesów odlewniczych związana jest z coraz bardziej intensywnym rozwojem metody odlewania w formach metalowych [1]. Zasadniczym wskaźnikiem oceny jakości odlewów dla tej technologii są własności mechaniczne. Czynnikiem decydującym w procesie wytwarzania o odpowiednich właściwościach mechanicznych i zabieleniu odlewów wykonanych w kokilach są: skład chemiczny metalu, temperatura przegrzania i zalewania metalu, temperatura wybicia odlewu z kokili, parametry termofizyczne i geometryczne odlewów i kokil, obróbka cieplna oraz kinetyka procesu krystalizacji [2, 3].

Zadaniem odlewni jest uzyskanie wyrobów o własnościach zawierających się w wąskich przedziałach zmienności, warunkujących najczęściej automatyczny proces obróbki mechanicznej. W zautomatyzowanym procesie odlewania kokilowego przy stałej temperaturze kokili, jednakowej grubości pokrycia ochronnego, stałej temperaturze wybicia odlewu o niedotrzymaniu takich paramaterów, jak R_m , H_B i zabieleniu - decydu-

je proces krystalizacji. Można więc założyć, że przyczyną wad jest niewłaściwa jakość ciekłego metalu [10]. Odpowiednio prowadzona kontrola ciekłego metalu połączona ze znajomością zasad korekty przed jego odleaniem stanowi główny kierunek w działaniach zmierzających do zmniejszenia liczby wad odlewniczych. Zastosowanie analizy termicznej i deriwacyjnej pozwala na określenie w krótkim czasie (około 5 min) własności, które będzie posiadał stop po zakrzepnięciu. Ocena podstawowych własności mechanicznych, gdy metal jest jeszcze w stanie ciekłym, daje możliwość sterowania jakością stopu.

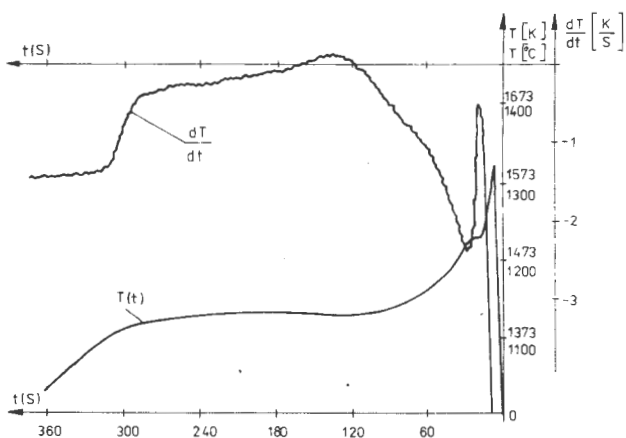
W przeprowadzonych badaniach podjęto próbę wykorzystania analizy termicznej i deriwacyjnej do określenia parametrów mechanicznych i zabielenia żeliwa nadeutektycznego przeznaczonego na odlewy kokilowe.

2. Przeprowadzenie badań

Badania przeprowadzono w odlewni żeliwa kokilowego Fabryki Silników Elektrycznych TAMEL w Tarnowie. Próbki do badań pobierano z dwóch pieców indukcyjnych tyglowych o pojemności 6 Mg o wyprawie kwaśnej [5]. Badaniami objęto 40 wytopów produkcyjnych. W celu rozszerzenia zmienności zbioru danych w trakcie jednego wytopu próbki pobierano trzykrotnie w różnych jego fazach. Było to zgodne z prowadzoną kontrolą jakości ciekłego metalu, obowiązującą w odlewni. Próbki pobierano po nawęgleniu i uzupełnieniu składu chemicznego, po korekcie składu chemicznego oraz przed spustem.

Do badań procesu krystalizacji zastosowano aparaturę pomiarową "Crystaldigraf" opracowaną w Politechnice Śląskiej. W trakcie badań odlewano równocześnie próbnik ATD-10 do rejestracji krzywych $T=f(t)$ i $dT/dt = f(t)$, próbki wytrzymałościowe, próbę schodkową do oceny grubości zabielenia, próbkę do analizy chemicznej.

Otrzymane w trakcie badań wykresy reprezentowały grupę żeliw eutektycznych i nadeutektycznych. Charakterystyczne przebiegi ATD dla żeliw nadeutektycznych przedstawiono na rys. 1. Zakres zmienności składu chemicznego otrzymanego w trakcie badań przedstawiono w tab. 1.



Rys. 1. Wykres krzywej stygnięcia i jej pochodnej żeliwa nadeutektycznego

Tabela 1. Zakres zmienności składu chemicznego badanych żeliw nadeutektycznych

Składnik	Zakres zmienności (%)	Wartość średnia (%)	Odchylenie standardowe (%)
C	3,50-4,30	3,84	0,17
Si	1,60-2,44	2,17	0,22
Mn	0,34-0,48	0,40	0,04
P	0,22-0,56	0,44	0,07
S	0,023-0,045	0,035	0,004
Cr	0,024-0,039	0,031	0,005

Na podstawie uzyskanego składu chemicznego obliczono wartość równoważnika węglowego CE według następującego wzoru:

$$CE = C_c + 0,31 Si + 0,33 P + 0,4 S - 0,027 Mn. \quad (1)$$

Wartość ta wynosiła od 4,28 do 5,11 przy $CE_{\text{śr.}} = 4,71$. Natomiast współczynnik nasycenia eutektycznego określony wzorem

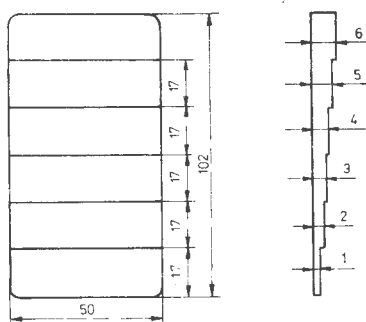
$$SC = \frac{C_c}{4,26 - 0,31 Si - 0,33 P - 0,4 S + 0,027 Mn} \quad (2)$$

wynosił od 0,998 do 1,23 przy $SC_{\text{śr.}} = 1,11$.

Przeprowadzono również badania wytrzymałości i twardości. Próbkę wytrzymałościową odlewano do specjalnej kokili, uzyskując przez to własności zbliżone do produkowanego wyrobu. Sposób odlewania i wykonanie próbek wytrzymałościowych przeprowadzono zgodnie z wymogami Działu Kontroli Jakości. Wytrzymałość na rozciąganie mieściła się w przedziale 154-359 MPa, przy wartości średniej 226 MPa i odchyleniu standardowym $\Delta R_m = 47$ MPa.

Pomiaru twardości dokonano na łbach zerwanych próbek wytrzymałościowych po sfrezowaniu pobocznic. Zawierała się ona w przedziale 128-205 HB, przy wartości średniej $HB_{\text{śr.}} = 159$ i odchyleniu standardowym $\Delta HB = 13$.

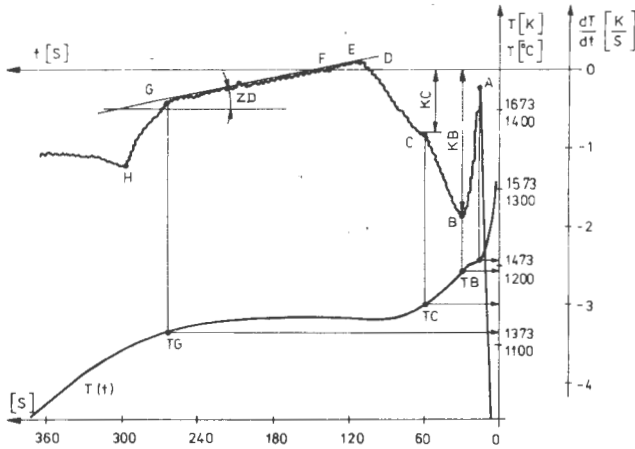
Pomiaru zabielenia dokonano na przelomie próby schodkowej, przy wartości średniej $G_{\text{zab.śr.}} = 3,9$ (mm) i odchyleniu standardowym $\Delta G = 1,7$ (mm). Próbkę do określenia zabielenia, przedstawioną na rys. 2, odlewano w kokili miedzianej.



Rys. 2. Próbkę schodkowa do oceny wielkości zabielenia

3. Ocena własności mechanicznych żeliwa nadeutektycznego

Prowadzone badania miały na celu określenie zależności zachodzących pomiędzy parametrami krzywej stygnięcia żeliwa i jej pochodnej a jego własnościami mechanicznymi. Charakterystyczne elementy kształtu krzywej deriwacyjnej opisano za pomocą współrzędnych punktów oraz kątów nachylenia stycznych do krzywej. Przebieg ATD z zaznaczonymi parametrami dla żeliwa nadeutektycznego przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Krzywa stygnięcia i deriwacyjna żeliwa nadeutektycznego z naniesionymi charakterystycznymi punktami

Poszukiwanie zależności między kształtem krzywej stygnięcia, jej pochodnej a własnościami mechanicznymi polega na określeniu funkcji uzależniających badane własności od parametrów kształtu krzywych. Do obliczeń zastosowano metodę regresji krokowej.

W wyniku obliczeń z zastosowaniem metod statystycznych uzyskano następującą zależność, określającą twardość żeliwa nadeutektycznego w funkcji parametrów ATD:

$$HB = 264,5 - 830,9 \frac{\ln TC/1000}{TC/1000} - 6,44 \frac{1}{KB} + 24,73 \left(\frac{ZD}{10} \right)^3 - 33,54 \left(\frac{ZD}{10} \right)^2 \quad (3)$$

Parametry statystyczne równania wynoszą:

wartość średnia	$HB_{sr.} = 159,5,$
odchylenie standardowe	$\Delta HB = 7,85,$
współczynnik korelacji	$R = 0,82$
test F dla funkcji regresji	$F = 19,65,$
test F krytyczny	$F_{(0,05; 4; 33)} = 2,65.$

gdzie

TC - temperatura maksymalnego efektu procesów krystalizacji faz, w zakresie temperatur TL-TS ($^{\circ}C$),

KB - szybkość stygnięcia po zakończeniu krystalizacji grafitu pierwotnego (K/s),

ZD - intensywność procesów krystalizacji eutektycznej (deg).

Analizując powyższą zależność można stwierdzić, że wraz ze wzrostem temperatury TC następuje spadek twardości. Ponieważ TC zmienia się proporcjonalnie do temperatury likwidusu TL, wzrost zakresu temperatur TL-TS powoduje zwiększenie wydzielenia grafitu, co daje w końcowym efekcie niższą twardość.

Parametr ZD odzwierciedla intensywność procesu krystalizacji eutektyki w temperaturze TS. Dla małych wartości kąta ZD następuje nieznamy spadek twardości. Po przekroczeniu wartości kąta 10^0 twardość żeliwa gwałtownie wzrasta. Wzrost kąta ZD związany jest ze skróceniem czasu krystalizacji eutektyki.

Wzrost wartości KB po zakończeniu krystalizacji grafitu pierwotnego powoduje podwyższenie twardości, co oznacza, że przy większych szybkościach stygnięcia w zakresie TL uzyskuje się niższą twardość.

Korzystając z metod statystycznych oraz parametrów ATD opracowano zależność dla określenia wytrzymałości, która ma następującą postać:

$$R_m = 410,7 + 7,26 \exp KC + 15,29 \left(\frac{ZD}{10}\right)^3 - 23,79 \left(\frac{ZD}{10}\right)^2 - 552,24 \frac{\ln TB/1000}{TB/1000} - 1005,46 \exp\left(-\frac{TL}{1000}\right). \quad (4)$$

Parametry statystyczne równania wynoszą:

wartość średnia	$R_{m\text{śr.}} = 229,6$ (MPa),
odchylenie standardowe	$\Delta R_m = 47$ (MPa),
współczynnik korelacji	$R = 0,81$,
test F dla funkcji regresji	$F = 12,75$,
test F krytyczny	$F(0,05; 5; 33) = 2,49$,

gdzie

KB - szybkość stygnięcia w punkcie C, określającym maksimum efektów cieplnych w zakresie temperatur TL-TS (K/s),

ZD - intensywność procesów krystalizacji eutektyki (deg),

TB - temperatura zakończenia krystalizacji grafitu pierwotnego ($^{\circ}\text{C}$),
TL - temperatura likwidusu ($^{\circ}\text{C}$).

Analiza powyższego równania wykazała, że decydujący wpływ na wytrzymałość ma intensywność procesów krystalizacji eutektyki, określona parametrem ZD. Im większa intensywność procesów krystalizacji eutektyki, tym wyższa wytrzymałość. Wpływ na wytrzymałość ma również wypadkowa oddziaływań temperatur likwidusu TL oraz zakończenia krystalizacji grafitu pierwotnego TB. Parametr KC określa szybkość stygnięcia w punkcie C. Im mniejsza szybkość stygnięcia w tym punkcie, tym wyższa wytrzymałość.

4. Określenie zabielenia żeliwa

Poszukując zależności pomiędzy zabieleniem a parametrami ATD ustalono, że najistotniejszy wpływ mają temperatury TL i TG, gdzie

TL - temperatura likwidusu ($^{\circ}\text{C}$),

TG - temperatura początku porządkowania się struktury sieci krystalicznej ($^{\circ}\text{C}$).

Zależność tę można opisać następującym równaniem:

$$G_{\text{zab.}} = 98311,6 - 123 \frac{\ln TL}{TL/1000} + 473,8 \left(\frac{1000}{TL}\right)^2 - 72566,9 \exp \frac{TG}{1000} + 99248,5 \left(\frac{TG}{1000}\right)^2 \quad (5)$$

Parametry statystyczne równania wynoszą:

wartość średnia $G_{\text{zab.}} \text{ śr.} = 3,93 \text{ (mm)},$

odchylenie standardowe $\Delta G_{\text{zab.}} = 1,08 \text{ (mm)},$

współczynnik korelacji $R = 0,81,$

test F dla funkcji regresji $F = 26,52,$

test F krytyczny $F_{(0,05; 4; 32)} = 2,67.$

Z równania (5) wynika, że im wyższa temperatura likwidusu, tym mniejsze zabielenie, co wiąże się z ilością wydzielanego grafitu pierwotnego. Natomiast wzrost temperatury TG powoduje skrócenie czasu krystalizacji eutektyki, co powoduje wzrost zabielenia.

5. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazały możliwość wykorzystania analizy termicznej i deriwacyjnej w celu określenia twardości, wytrzymałości i zabielenia żeliwa nadeutektycznego. Własności mechaniczne w dużym stopniu zależą od kształtu krzywej deriwacyjnej, czyli od kinetyki procesów krystalizacji. Ocenę interesujących parametrów można otrzymać, gdy metal jest w stanie ciekłym i istnieje możliwość jego poprawy na drodze zabiegów technologicznych, co pozwala na sterowanie jakością stopu.

Przedstawione równania są pod względem statystycznym istotne, a o trafności doboru modelu świadczy przeprowadzona analiza reszt. Na jej podstawie można stwierdzić, że dokładność określenia wytrzymałości na rozciąganie jest wystarczająca dla warunków przemysłowych, gdyż błędy wynikające z tej metody mieszczą się w granicach klasy żeliwa. Dzięki krótkotrwałemu procesowi pomiaru oraz łatwemu odczytowi danych metoda ta może znaleźć szerokie zastosowanie w praktyce przemysłowej odlewni żeliwa.

Literatura

- [1] Z. Górny: Przegląd Odlewnictwa, 10-11 (1980) 340-344.
- [2] Z. Górny, W. Chabowski, J. Zakrzewski, K. Bruzda: Odlewanie kokilowe stopów żelaza, WNT, Warszawa 1972.
- [3] J. Sokołowski: Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1974.
- [4] W. Sakwa: Żeliwo, Śląsk, Katowice 1974.
- [5] J. Dańko, R. Kubala: Przegląd Odlewnictwa, 7-8 (1968) 257-262.
- [6] S. Jura, J. Sakwa: Przegląd Odlewnictwa, 2 (1980) 29-31.
- [7] S. Jura, J. Sakwa, K. Borek: Przegląd Odlewnictwa, 1 (1980) 7-10.
- [8] S. Jura, J. Sakwa: Krzepnięcie metali i stopów, nr 5, 1982 s. 5-29.
- [9] V. Volk: Statystyka stosowana dla inżynierów, WNT, Warszawa 1973.
- [10] B. Marincek: Przegląd Odlewnictwa 8 (1980) 245-250.