

Stanisław JURA
Jadwiga SAKWA
Kazimierz BOREK

ZASTOSOWANIE ANALIZY RÓŻNICZKOWEJ DO OKREŚLENIA WŁASNOŚCI MECHANICZNYCH ŻELIWA SZAREGO

Streszczenie. W pracy opisano aparaturę pomiarową oraz podano podstawy teoretyczne interpretacji krzywych różniczkowych. Na podstawie przeprowadzonych badań wykonano obliczenia statystyczne i podano wzory określające twardość oraz wytrzymałość żeliwa szarego, w zależności od punktów charakterystycznych krzywych stygnięcia i krzywych różniczkowych.

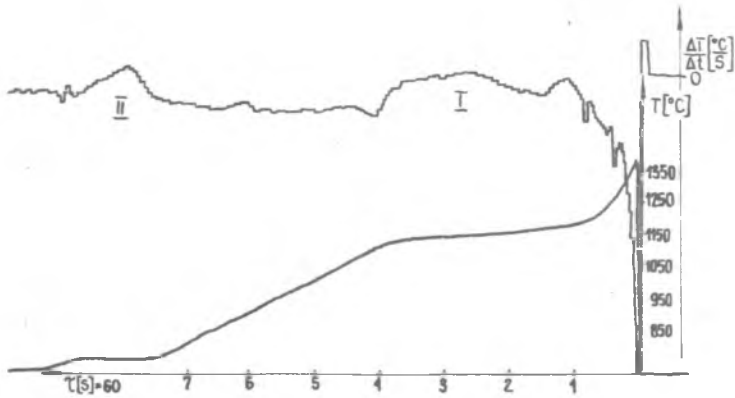
1. METODA KALORYMETRII RÓŻNICZKOWEJ

Analiza termiczna w ostatnich latach przeżywa swój renesans. Oprócz szeroko stosowanej i znanej klasycznej analizy termicznej, polegającej na rejestracji krzywej stygnięcia $T = f(t)$, rozpowszechnia się ostatnio metoda kalorymetrii różniczkowej, tj. równoczesnej rejestracji krzywej stygnięcia z jej pierwszą pochodną $dT/dt = f(t)$. Z przebiegu pierwszej pochodnej omawianej funkcji można wnioskować o zjawiskach zachodzących w trakcie krzepnięcia odlewu. Wiele publikacji [1, 2, 3] porusza problem wykorzystania analizy różniczkowej do oceny jakości żeliwa i staliwa. Wydaje się jednak, iż nie określają one w dostatecznym stopniu zależności pomiędzy parametrami opisującymi kształt krzywej różniczkowej, a własnościami technologicznymi stopu, takimi jak: twardość, wytrzymałość na rozciąganie czy współczynnik nasycenia lub węgiel ekwiwalentny. Do tej pory ograniczono się do analizy jakościowej.

Autorzy niniejszej publikacji podjęli próbę interpretacji krzywej różniczkowej, w zależności od zmian parametrów technologicznych oraz określili równania łączące twardość, wytrzymałość na rozciąganie, współczynnik nasycenie i węgiel ekwiwalentny ze stopniem przechłodzenia temperaturą likwidus, solidus i parametrami kształtu krzywej różniczkowej.

Krzywą różniczkową żeliwa można podzielić na dwie zasadnicze części: część odpowiadającą przemianom eutektycznej I i część odpowiadającą przemianom eutektoidalnej II rys. 1. Część krzywej związanej z przemianą eutektyczną określa kinetyka krystalizacji dendrytów i eutektyki. Na podstawie przebiegu tej części krzywej można także określić wartość przechłodzenia eutektycznego, wartość wydzielającego się ciepła krystalizacji pierwotnej.

Pierwsza część może także służyć jako wartościowy wskaźnik własności mechanicznych żeliwa.

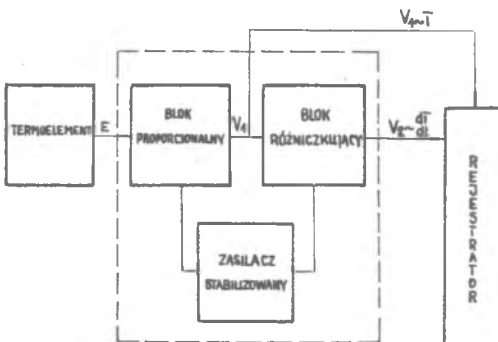


Rys. 1. Typowy przebieg krzywej stygnięcia i jej pierwszej pochodnej

2. APARATURA POMIAROWA

Aparatura pomiarowa do rejestracji krzywych stygnięcia i jej pochodnych składa się z dwóch zasadniczych części: bloku proporcjonalnego, wytwarzającego sygnał $V_1 \propto T$ oraz bloku różniczkującego o sygnał wyjściowych

$V_2 \propto dT/dt$. Ilustruje to schemat blokowy pełnego zestawu pomiarowego (rys. 2), w skład którego oprócz opisywanego przyrządu wchodzi czujnik termoelektryczny oraz dwukanałowy rejestrator. W konstrukcji urządzenia zastosowano półprzewodnikowe układy scalone wysokiej klasy oraz precyzyjne elementy biernie. Zapewnia to dużą dokładność i niezawodność działania, a ponadto zmniejsza pobór mocy oraz wymiary geometryczne przyrządu. Blok różniczkujący o oryginalnym, opatentowanym rozwiązaniu, wykorzystującym analogową technikę impulsową ze-



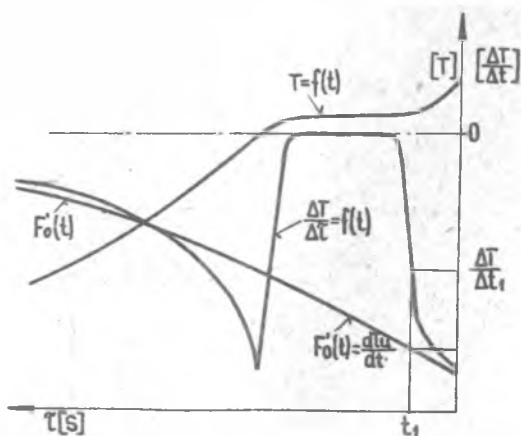
Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego

pewnia niezbędne stałe różniczkowania T_0 o odpowiednio dużych i stabilnych wartościach. Pod tym względem przyjęte rozwiązanie odznacza się własnościami porównywalnymi z parametrami dużo droższych urządzeń cyfrowych, a znacznie przewyższa możliwość klasycznych układów analogowych.

Do rejestracji przebiegów sygnałów wyjściowych $V_1 = T$ i $V_2 = dT/dt$ może służyć większość współczesnych rejestratorów napięcia stałego, dwukanałowych o zapisie ciągłym i standardowych zakresach 0-5 V.

3. TEORETYCZNE PODSTAWY INTERPRETACJI KRZYWYCH RÓŻNICZKOWYCH

Dotychczasowa interpretacja krzywych różniczkowych procesu krystalizacji ogranicza się do określenia ogólnych zależności lub raczej kierunku powiązań pomiędzy kątami nachylenia funkcji $\frac{dT}{dt}$, wysokością czy głębokością pików a technologicznymi parametrami stopu, takimi jak: stopień zanieczyszczenia stopów wtrąceniami niemetalicznymi, skłonnością staliwa do pęknięć na gorąco. Analiza kalorymetryczna (4) procesu krystalizacji przeprowadzona na bazie krzywych różniczkowych pozwala na dokładniejsze określenie własności badanego stopu, niestety ze względu na czasochłonne obliczenia nie może być stosowana w warunkach przemysłowych do oceny jakości ciekłego metalu.



Rys. 3. Schematyczny zapis krzywej stygnięcia i krystalizacji staliwa

Przedstawiony na rys. 3 wykres krzywej stygnięcia $T = f(t)$ oraz jej pierwszej pochodnej w funkcji czasu $\frac{dT}{dt} = f(t)$ jest typowy dla jednofazo-

wego stopu. W celu przeprowadzenia teoretycznej analizy procesów cieplnych zachodzących podczas krzepnięcia stopu naniesiono krzywą zerową $F_0 = T_u(t)$. Przebieg funkcji zerowej określa proces stygnięcia stopu bez przemian fazowych, a więc już z definicji funkcji zerowej wynika, iż różnice między funkcją zerową F_0 a wykresem pierwszej pochodnej krzywej stygnięcia stanowią o procesach cieplnych przemian fazowych. Elementarny efekt cieplny procesów zachodzących podczas krystalizacji można zapisać w następującej postaci:

$$dQ = {}^{\circ}C_p dT \quad (1)$$

Dzieląc obustronnie (1) przez dt otrzymujemy równanie zmiany ciepła w jednostce czasu. Zmiana ciepła jest proporcjonalna do zmiany temperatury w jednostce czasu.

$$\frac{dQ}{dt} = C_p \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

Obliczając bilans energetyczny dla danego procesu w chwili t_1

$$= Q_{kr} + Q_p, \quad (3)$$

gdzie: Q_c jest całkowitym ciepłem oddawanym w rozpatrywanym przez nas procesie, Q_{kr} ciepłem krystalizacji a Q_p ciepłem wydzielanym przez formę piaskową do otoczenia, możemy obliczyć ciepło krystalizacji wydzielane w tym procesie

$$Q_{kr} = Q_c - Q_p \quad (4)$$

korzystając z (1) i (3)

$$\frac{dQ_{kr}}{dt} = C_p F'_0(t) \Big|_{t_1} - K \frac{dT}{dt} \Big|_{t_1} = C_p \frac{dT_u}{dt} \Big|_{t_1} - K \frac{dT}{dt} \Big|_{t_1}, \quad (5)$$

gdzie:

dQ_{kr} - efekt cieplny procesu krystalizacji w chwili t_1 ,

C_p - ciepło właściwe,

$\frac{dT_u}{dt}$ - pochodna funkcji zerowej,

K - stała.

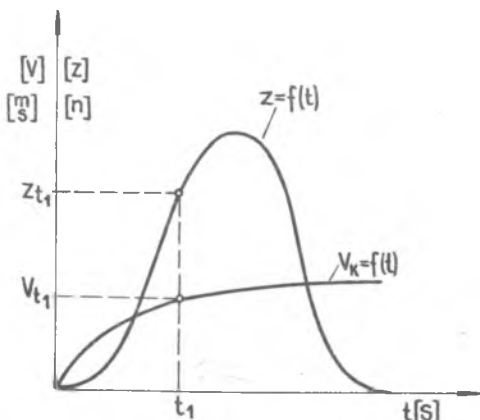
W pierwszym przybliżeniu z małym błędem ilościowym dla procesu możemy przyjąć

$$C_p = \frac{dT_u}{dt} = A \text{ constans} \quad (6)$$

a więc równanie (5) można zapisać

$$\frac{dQ_{kr}}{dt} = K_r \frac{dT}{dt}, \quad (7)$$

gdzie K_r jest stałą krystalizacji uwzględniającą wartość stałej A .



Rys. 4. Schemat przebiegu procesu krystalizacji i zarodkowania

Na rys. 4 przedstawiono kinetykę procesu krystalizacji. Szybkość wzrostu kryształu w początkowej fazie rośnie a następnie się stabilizuje. Radialny przyrost masy na rosnącym kryształcie można określić według zależności (8)

$$r = B\sqrt{t}, \quad (8)$$

gdzie:

r - grubość warstwy po czasie t ,

B - stała,

t - czas narastania warstwy.

Obliczając pochodną po czasie równaniz (10) otrzymamy prędkość narastania kryształu

$$v_k = \frac{dr}{dt} = \frac{B}{2\sqrt{t}} = C t^{-1/2}$$

Zmianę liczby zarodków w funkcji czasu można opisać następującą zależnością:

$$Z = D e^{-Et^2}, \quad (9)$$

gdzie D i E są stałymi.

Równanie (9) opisuje procesy statyczne powstawania zarodków. Rozważając przebieg procesu krystalizacji (rys. 4) w chwili t_1 przy określonej liczbie zarodków Z_1 i prędkości V_1 wydzielane ciepło można opisać równaniem (10):

$$dQ_T = F V(t_1) Z(t_1), \quad (10)$$

gdzie:

F - stała,

V - prędkość krystalizacji,

Z - liczba zarodków.

Porównując ciepło krystalizacji obliczane z bilansu energetycznego z ciepłem określonym równaniem (10) otrzymujemy

$$dQ_T = dQ_{kr}$$

$$K_r \frac{dT}{dt} = F V(t_1) Z(t_1) \quad (11)$$

Z równania (11) jednoznacznie wynika, iż pierwsza pochodna funkcji $T = f(t)$ ma istotny związek z iloczynem prędkości wzrostu kryształu i liczby zarodków. Obliczając drugą pochodną względem czasu $T = f(t)$ otrzymujemy:

$$\frac{d^2T}{dt^2} = F' \frac{dV}{dt} Z + F' V \frac{dZ}{dt}, \quad (12)$$

gdzie: $F' = \frac{F}{K_r}$.

Obliczając poszczególne składniki sumy otrzymujemy

$$F' \frac{dV}{dt} Z = -Z F' \frac{C}{2} t^{-3/2}$$

$$F' V \frac{dZ}{dt} = -F' V DE 2 t e^{-Et^2} \quad (13)$$

więc równanie (12) można zapisać w następującej postaci:

$$\frac{d^2T}{dt^2} = \frac{F' Z C}{2} t^{-3/2} - F' V DE 2 t e^{-Et^2} \quad (14)$$

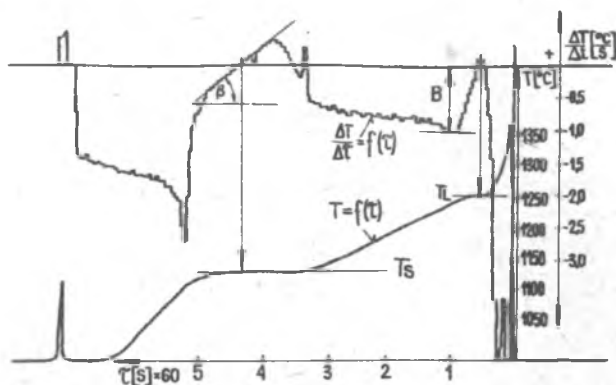
Dla określenia parametrów charakteryzujących przebieg drugiej pochodnej, należy określić tangens kąta nachylenia stycznych do $\frac{dT}{dt}$, czyli do pierwszej pochodnej w jej charakterystycznych punktach.

Przedstawiona interpretacja analizy różniczkowej pozwala na określenie podstawowych parametrów krystalizacji, co umożliwia sterowanie jakością stopów.

4. OKREŚLENIE TWARDOŚCI I WYTRZYMAŁOŚCI NA ROZCIĄGANIE ŻELIWA SZAREGO METODĄ ANALIZY RÓZNICZKOWEJ

Przeprowadzono badania mające na celu opracowanie zależności pomiędzy parametrami krzywej różniczkowej oraz krzywej stygnięcia żeliwa a jego własnościami mechanicznymi. Charakterystyczne elementy kształtu krzywej

różniczkowej żeliwa szarego opisano kątami nachylenia stycznych do krzywej różniczkowej z osią czasu i wysokościami poszczególnych pików (rys. 5). Zastosowanie metody regresji krokowej do określenia istotnych parametrów kształtu krzywej różniczkowej wyeliminowało poza parametrem β i B pozostałe wielkości. Długość odcinka B, łączącego minimum lokalne funkcji $\frac{dT}{dt}$ występujące po pikie związanym z początkiem krystalizacji dendrytycznej jest miarą parametru B. Pik związany z krystalizacją eutektyki charakterystycznie załamuje się w końcowym etapie procesu.



Rys. 5. Typowy zapis krzywych stygnięcia i krystalizacji żeliwa

Parametr β jest miarą kąta nachylenia krzywej różniczkowej do osi czasu przed załamaniem krzywej. Poszukiwania zależności pomiędzy kształtem krzywych stygnięcia i ich pochodnych a właściwościami mechanicznymi żeliwa polegają na określeniu z możliwie dużą dokładnością funkcji uzależniających właściwości żeliw (R_m , HB) od parametrów kształtu krzywych różniczkowych.

5. WYNIKI ANALIZY STATYSTYCZNEJ ZALEŻNOŚCI OKREŚLAJĄCYCH TWARDOŚĆ

Zmiana twardości w zależności od kształtu krzywych różniczkowych, tzn. zmiana wielkości HB w zależności od zmiany parametrów krzywej stygnięcia i krzywej różniczkowej, a więc postać wyrażenia $HB = f(B, TL, TS)$, przedstawia się następująco

$$HB = 203,12 + 2,53 \cdot 10^{-5} (TL - TS)^3 - 1,43 \cdot 10^{-4} B^3 \quad (15)$$

Parametry statystyczne równania (15) wynoszą:

- odchylenie standardowe $HB = 22,4$,
- współczynnik regresji $R = 0,71$,
- wartość średnia $HB_{\bar{g}_r} = 218,7$,
- odchylenie standardowe jako procent wartości średniej - 10,2%,
- test F dla funkcji regresji $F = 40,9$,
- test F krytyczny wynosi $F_{(0,01)} = 4,88$.

Przeprowadzona analiza reszt równania (15) świadczy o właściwym doborze modelu. Jak wynika z analizy równania, w miarę zwiększania wartości parametru B twardość maleje. Wpływ różnicy temperatur (TL - TS) jest istotny, gdy różnica między temperaturą likwidusu i solidusu osiąga wielkości większe od 40°C, wtedy twardość żeliwa szybko wzrasta.

6. WYNIKI ANALIZY STATYSTYCZNEJ ZALEŻNOŚCI OKREŚLAJĄCYCH WYTRZYMAŁOŚĆ ŻELIWA

Stosując analogiczną metodę poszukiwania funkcji regresji, jak dla twardości, uzyskano równanie określające wytrzymałość. Zależność wytrzymałości na rozciąganie w funkcji parametrów krzywej różniczkowej opisano wzorem

$$R_m = 340,6 + 0,5 (TL-TS) - \frac{1326}{(TL-TS)} - 3,1 B - \frac{745}{B} + 59,7 \operatorname{tg} \beta \quad (16)$$

Parametry statystyczne równania (16) wynoszą:

- odchylenie standardowe $R_m = 30 \text{ MPa}$,
- współczynnik regresji $R = 0,86$,
- wartość średnia $R_{m\bar{s}_r} = 277,3 \text{ MPa}$,
- odchylenie standardowe jako procent wartości średniej 10,8%,
- test F dla funkcji R_m $F = 42,6$,
- test F krytyczny wynosi $F_{(0,01)} = 3,26$.

Oznaczenia zmiennych występujących w równaniu (16) są takie same jak dla (15).

Analogicznie jak dla równania (15) przeprowadzono analizę reszt zależności (16). W oparciu o nią stwierdzono, iż równanie jest poprawne pod względem doboru zmiennych a równomierny rozrzut wskazuje na adekwatność równania. Istotnym składnikiem mającym wpływ na wytrzymałość na rozciąganie ma różnica temperatur (TL-TS). Wytrzymałość wyraźnie się zwiększa ze wzrostem tej wielkości, natomiast jest odwrotnie proporcjonalną do wielkości parametru B. Stosunkowo najmniej wpływ na przebieg opisywanej zależności ma parametr, lecz przesuwają on cały wykres o rząd dwudziestu jednostek w skali R_m przy jego wzroście o 10 (K).

7. WNIOSKI

Wyniki badań potwierdziły prace prowadzone przez inne ośrodki nad wykorzystaniem krzywych krystalizacji i krzywych stygnięcia do określenia jakości żeliwa [3, 4, 5]. Tak jak można było się spodziewać własności mechaniczne ściśle wiążą się z kształtem krzywych różniczkowych. Opracowanie równań (15) i (16) w formie tablic daje duże możliwości użytkowe. W czasie kilku minut możliwe jest określenie ze stosunkowo małym błędem klasy żeliwa, gdy metal znajduje się jeszcze w kadzi. Istnieje więc możliwość poprawy jakości odlewu na drodze zabiegów technologicznych. Dzięki krótkotrwałemu oraz łatwemu odczytowi metoda ta może znaleźć szerokie zastosowanie w praktyce przemysłowej odlewni żeliwa, przyczyniając się do poprawy jakości żeliwa oraz podnoszenia poziomu technologicznego odlewni.

LITERATURA

- [1] Ableidinger K., Strizik P.: Fonderie 1975 nr 342 s. 59.
- [2] Ableidinger K., Strizik P.: Giesserei Kongres Lisboa 1975 ref. nr 3.
- [3] Czech A., Rabus D.: 40 Kongres Odlewnictwa 1973 ref. 25, Moskwa.
- [4] Rabus D.: Poltenst Giesserei Rundsch nr 9, 1972, s. 1-8, s. 1-7.
- [5] Skolienko S., Kazaczkow A.: Slitki dla krupnych pokowok, Moskwa "Metalurgia" 1973.
- [6] Czikiel J.: 43 Giesserei Kongress - Bukareszt 1976, ref. nr 1.
- [7] Czikiel J.: 44 Giesserei Kongress - Florencja 1977, ref. nr 6.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СЕРОГО ЧУГУНА

Р е з ю м е

В работе описана измерительная аппаратура и представлены теоретические основы интерпретации дифференциальных кривых. На основании проведенных исследований осуществлены статистические расчеты и поданы формулы, определяющие твердость и прочность серого чугуна в зависимости от характеристических точек кривых остывания и дифференциальных кривых.

THE UTILIZATION OF DIFFERENTIAL ANALYSIS IN DEFINING
MECHANICAL PROPERTIES OF GREY CAST IRON

S u m m a r y

The paper describes the measuring apparatus, and presents the theoretical basis of interpretation of differential curves. Basing on their in-

vestigations, the authors have performed the statistical calculations and have given the formulae determining the hardness and strength of grey cast iron, dependent on the characteristic points of cooling curves and differential curves.