16/40

Solidification of Metals and Alloys,
Year 1999, Volume 1, Book No. 40
Krzepnięcie Metali i Stopów,
Rok 1999, Rocznik 1, Nr 40
PAN – Katowice PL ISSN 0208-9386

FUNKCYJNY OPIS KRZYWEJ HARTOWNOŚCI

JURA Stanisław., BARTOCHA Dariusz
Katedra Odlewnictwa, Politechniki Śląskiej,
44-100 Gliwice Towarowa 7, POLAND

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono metodę wyznaczenia funkcyjnej zależności rozkładu twardości od składu chemicznego stali. Zaproponowana metoda polega na doborze odpowiedniej modelowej funkcji opisującej krzywą hartowności, a następnie na drodze regresji nieliniowej dopasowaniu jej do pomiarowych krzywych hartowności poszczególnych stali w wyniku czego uzyskuje się zbiór parametrów modelowej funkcji przyporządkowanych konkretnym stalom bądź staliwom o znanym składzie chemicznym. Tak opracowaną bazę danych poddano analizie regresji krokowej w celu opracowania statystycznych zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami modelowej funkcji rozkładu twardości a składem chemicznym stali bądź staliwa. Korzystając z tych zależności możliwe jest określenie wyniku hartowania na podstawie składu chemicznego materiału. Ponadto wykorzystując pochodną dopasowanej krzywej hartowności bądź teoretycznej krzywej hartowności określono obszar; opisany parametrem λ, w którym zachodzą najintensywniejsze zmiany twardości. Im mniejsza jest wartość tego parametru tym obszar zmienności w próbce (odlewie) jest mniejszy. Mała wartość parametru λ informuje że, zmiany strukturalne zachodzą w wąskim paśmie objętości odlewu lub przedmiotu obrabianego cieplnie, czego wynikiem jest znaczna koncentracja naprężeń strukturalnych będąca przyczyną pęknięć hartowniczych.

Opracowanie funkcji zmian twardości w próbie Jominy'ego daje możliwość szczegółowej analizy procesu przemian w czasie hartowania wytworów z możliwością sterowania jego wynikami na etapie projektowani składu chemicznego materiału.

1. Wstęp

Określanie hartowności danego gatunku stali i staliwa najczęściej odbywa się na podstawie pasma hartowności, które jest zbiorem wyników wielu prób hartowania od czoła przeprowadzonych na próbkach odpowiadających składem chemicznym danemu gatunkowi stali. W typowym paśmie hartowności stali węglowych i niskostopowych rozrzut twardości sięga 10 i więcej jednostek, zatem błąd ocen może sięgać nawet 20%. Hartowność, zdolność materiału do tworzenia struktury martenzytycznej uzależniona jest przede wszystkim od składu chemicznego stali czy staliwa i szybkości chłodzenia. Próba oceny hartowności metodą hartowania od czoła (Jominy'ego) jest znormalizowaną próbą, zatem warunki jej przeprowadzania (szybkość chłodzenia próbki) można uznać za stałe. Dlatego rozrzut twardości w typowych dla gatunku pasmach hartowności uzależnić można od różnic w składzie chemicznym stali w obrębie jednego gatunku. Celem niniejszego opracowania jest określenie tej zależności funkcyjnej.

2. Modelowa krzywa hartowności

Krzywa hartowności opisuje zmiany twardości próbki, w zależności od odległości od chłodzonego strumieniem wody czoła i jest wynikiem próby Jominy'ego wykonanej dla stali o określonym, znanym składzie chemicznym. Biorąc pod uwagę charakter typowych krzywych hartowności jako ich matematyczny odpowiednik wykorzystano funkcję w postaci:

$$HRC = \frac{H}{1 + \exp[Z \cdot (D - Di)]} + B + A \cdot D \qquad (1)$$

gdzie:
HRC – twardość Rockwella w dowolnym odległym o D od czoła punkcie próbki,
$D = \sqrt{a}$, a – odległość od czoła próbki [mm],
H, Z, Di – parametry funkcji zmian twardości,
H – wielkość przedziału twardości (max – min),
Z – intensywność zmian twardości wzdłuż próbki,
Di – pierwiastek odległości od czoła próbki do przekroju o najintensywniejszych zmianach twardości,
B, A – parametry prostej odniesienia.

Określając wstępnie zależności pomiędzy charakterem zmian twardości a składem chemicznym zebrano wyniki prób Jominy'ego trzydziestu różnych stali o znanym składzie chemicznym próbek. Do każdej pomiarowej krzywej hartowności dopasowano, wykorzystując analizę regresji nieliniowej, krzywą opisaną równaniem (1) o odpowiednich wartościach parametrów H, Z, Di, B, A, (tabela. 2., rys. 1.) wartości współczynników korelacji poszczególnych krzywych pomiarowych z dopasowanymi

zawierały się w przedziale: <0.991,0.999>. Ponadto wykorzystano pochodne dopasowanych krzywych hartowności (2) w celu określenia odległości D_p (3) od czoła, w której następuje początek istotnych zmian twardości i odległości D_k (4), w której następuje koniec istotnych zmian twardości. Funkcja zmian wyznaczona została w stosunku do prostej odniesienia.

$$\frac{dHRCdp}{dD} = \frac{H \cdot Z \cdot \exp(Z \cdot (D - Di))}{(1 + \exp(Z \cdot (D - Di)))^2} \tag{2}$$

dp – oznaczenie funkcji dopasowanej,

$$D_p = Di - 4\sqrt{\lambda} \tag{3}$$

$$D_k = Di + 4\sqrt{\lambda} \tag{4}$$

gdzie:

$$\lambda = \frac{2 + \sqrt{3}}{Z} \tag{5}$$

3. Zależność parametrów funkcji od składu chemicznego stali

Dysponując zbiorem parametrów (H, Z, Di, B, A) funkcji rozkładu twardości opisujących w sposób dokładny pomiarowe krzywe hartowności oraz znając skład chemiczny użytych do badań stali, stosując metodę regresji krokowej wyznaczono statystyczne zależności do obliczeń parametrów funkcji rozkładu twardości:

$$H = 45.4 - 6.1 \cdot Mn^2 - 12.6 \cdot Ni^2 - 6.7 \cdot \frac{Cr}{C} + 78.1 \cdot C \cdot Ni - 59.8 \cdot Si \cdot Ni - 333.7 \cdot Mo \cdot Cu \tag{6}$$

$$Z = 2.1 - \frac{0.007}{Mo} 1.6 \cdot C \cdot Mn - 10.6 \cdot C \cdot Cr - 197.3 \cdot C \cdot Si \cdot Mn \cdot Cr \cdot Ni \cdot Mo \cdot Cu \tag{7}$$

$$Di = -0.2 + \frac{0.2}{Cu} + 35.1 \cdot C \cdot Cu + 1.3 \cdot Si \cdot Cr + 972.5 \cdot C \cdot Si \cdot Mn \cdot Cr \cdot Ni \cdot Mo \cdot Cu \tag{8}$$

$$B = 9.2 + 26.2 \cdot C \cdot Mn + 14.5 \cdot Mn \cdot Cr - 13.8 \cdot Mn \cdot Ni + 58.6 \cdot Si \cdot Ni + 58.7 \cdot Cr \cdot Mo \tag{9}$$

Przedstawione zależności opracowano na podstawie danych z 30 prób Jominy'ego. Wartości średnie i zakres zmienności składu chemicznego próbek oraz wartości średnie i zakres zmienności parametrów dopasowanej funkcji rozkładu i parametrów funkcji rozkładu obliczonych na podstawie składu chemicznego próbek przedstawiono w tabeli. 2.. Współczynnik kierunkowy prostej bazowej A zdecydowano się przyjąć jako średnią wartość współczynników wszystkich funkcji dopasowanych. Wielkość ta wynosi:

A = - 0.403.

Tabela. 1. Parametry statystyczne wyznaczenia zależności (6-9).
Table. 1. The statistical parameters of determine dependence (6-9).

Parametr funkcji	Wartości parametrów statystycznych			
	Wsp. korelacji R	Odch. standardowe σ	Test F	Test W
H	0.9749	2.084	47.90	14.40
Z	0.8732	0.148	12.03	3.32
Di	0.9744	0.193	75.11	15.82
B	0.9735	2.238	58.09	14.59

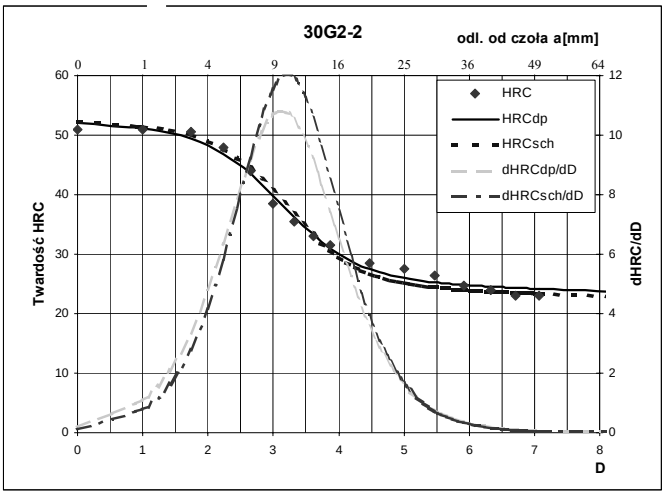
Tabela. 2. Skład chemiczny, parametry dopasowanej funkcji rozkładu twardości i parametry funkcji rozkładu twardości obliczone na podstawie składu chemicznego na przykładzie stali 30G2 i 40CrMo4, ich wartości średnie i zakres zmienności dla całego zbioru danych.
Table. 2. The chemical constitution, the parameters of the adapted distribution hardness function and parameters of distribution hardness function calculated on the basis of chemical constitution steel 30G2 and 40CrMo4 as an example and their mean value and range of variability for whole data set.

Ozn. stali	Skład chemiczny [%]							Wartości parametrów funkcji dopasowanych i obliczonych na podstawie składu chemicznego								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Hdp	Hsch	Zdp	Zsch	Didp	Disch	Bdp	Bsch	Adp = Asch
30G2	0.32	1.62	0.23	0.23	0.24	0.01	0.10	25.3	26.1	1.7	1.8	3.1	3.2	26.9	26.2	-0.403
40Cr Mo4	0.40	0.70	0.20	1.01	0.16	0.16	0.20	20.2	17.5	1.6	1.6	4.3	4.2	39.0	36.7	-0.403
Wartości średnie i zakres zmienności dla całego zbioru danych																
Średnia	0.39	0.86	0.38	0.84	0.40	0.10	0.13	19.97	20.00	1.67	1.67	4.32	4.36	35.94	36.20	
Odch. St. σ	0.05	0.33	0.31	0.32	0.50	0.08	0.04	7.60	7.66	0.24	0.24	0.76	0.74	6.43	6.71	
Min.	0.31	0.59	0.19	0.05	0.10	0.01	0.10	10.07	9.33	1.30	1.37	3.13	3.22	24.73	25.95	
Max.	0.49	1.62	1.21	1.14	1.47	0.21	0.21	33.09	32.61	2.23	1.99	5.78	5.66	45.11	44.53	
dp – parametry dopasowane sch – parametry obliczone na podstawie składu chemicznego																

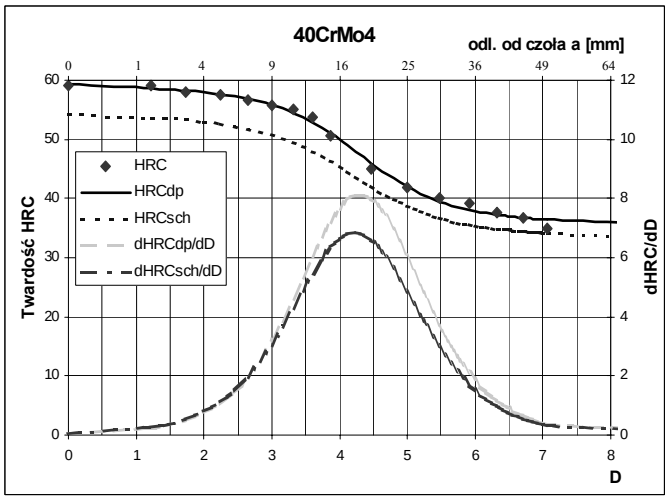
4. Wyniki

Wykorzystując opracowane zależności (6-9) wykonano obliczenia sprawdzające, na podstawie składu chemicznego stali obliczono parametry funkcji rozkładu twardości i wyznaczono funkcję hartowności, którą porównano z pomiarową i dopasowaną krzywą hartowności. Typowe wyniki badań i analiz statystycznych przeprowadzono dla przypadku najlepszego dopasowania (staliwo 30G2) i dopasowania z największym odchyleniem (staliwo 40CrMo4). Wyniki przedstawiono graficznie na rys. 1..

a)



b)



Rys. 1. Graficzne zestawienie wyników dla dwóch przykładowych stali: a) stal 30G2, b) stal 40CrMo4.

Fig. 1. Graphic juxtaposition results for two example steel: a) steel 30G2. b) steel 40CrMo4.

5. Wnioski.

Przedstawione wyniki pracy pozwalają na określenie procesu przemian w próbkach hartowanych. Uzyskanie informacji o miejscu maksymalnej intensywności przemian (Di) pozwala na odpowiedni dobór procesu obróbki cieplnej odlewów. W procesach obróbki cieplnej ważnym jest również zakres istotnych zmian opisywany parametrem λ. Im mniejsza jest to wartość tym obszar zmienności w próbce (odlewie) jest mniejszy. Mała wartość parametru λ informuje że, zmiany strukturalne zachodzą w wąskim paśmie objętości odlewu lub przedmiotu obrabianego cieplnie, czego wynikiem jest znaczna koncentracja naprężeń strukturalnych będąca przyczyną pęknięć hartowniczych.

Opracowanie funkcji zmian twardości w próbie Jominy'ego daje możliwość szczegółowej analizy procesu przemian w czasie hartowania wyrobów z możliwością sterowania jego wynikami na etapie projektowani składu chemicznego materiału.

MODELING OF HARDNESS CURVE

ABSTRACT

The paper presents method of prospecting experimental dependence binding in simply and clear-cut way distribution of hardness represented of the Jominy hardness curve with chemical constitution steel or steel cast.

The propose method consist on first selection adequate model of function described hardness curve that next fit to measurement hardness curve of individual steel on nonlinear regression way. Results is data set of parameters of model function assigned to individual steel or steel cast with specific chemical constitution. Stepwise regression analysis this data given possibilities to work out statistical dependence between individual parameters of the model distribution hardness function and chemical constitution steel or steel cast. Using this statistical dependence giving abilities to predicting results of hardening on basis chemical constitution of material. The function of changes hardness in Jominy test giving abilities to detailed (parameters λ and Di) analysis process of transformation in hardening process of sample product with abilities to control its results on stage of design chemical constitution steel or steel cast

LITERATURA.

[1] Charakterystyka stali. Stale konstrukcyjne stopowe. Seria C. Tom 1. Część 1. – Instytut Metalurgii i Żelaza im. S. Staszica w Gliwicach. Wyd. Śląsk 1975.

[2] Cybo J., Jura S.: Funkcyjny opis struktur izometrycznych w metalografii ilościowej. Wyd. Pol. Śl. Gliwice 1995.

[3] Suchoń J., Cybo J., Jura S., Chmiela J., Służałek G.: Zmiany stereologiczne struktury a profil twardości walców żeliwnych. Krzepnięcie Metali i Stopów, 1995, nr 24. s. 113.

Recenzował
Prof. dr hab. inż. Janusz Braszczyński
Prof. dr hab. inż. Przemysław Wasilewski