

Angel Reyea

Krzysztof Sadowski

WPŁYW SKŁADU CHEMICZNEGO I NISKOTEMPERATUROWEJ
OBRÓBKII CIEPLNEJ NA ZMIANĘ TWARDOŚCI ŻELIWI
CHROMOWO-NIKLOWYCH
(komunikat)

1. Wstęp

Żeliwa chromowe z dodatkiem niklu mają szerokie zastosowanie, głównie na części maszyn narażonych na zużycie. Przyczyną dobrej odporności na zużycie tych żeliw jest struktura, w której występują węgliki chromu rozłożone w osnowie austenitu (ewentualnie produktów jego rozpadu), ferrytu lub też mieszaninie tych faz [1, 2]. Tak duża różnorodność struktury osnowy jest wynikiem celowego doboru składu chemicznego, a zmieniana może być dodatkowo przez odpowiednią obróbkę cieplną [1, 2].

Dla uzyskania właściwej struktury (a jednocześnie odpowiedniej twardości) stosować można dwa rodzaje obróbki cieplnej, a mianowicie wysoko- lub niskotemperaturową (nad- lub podkrytyczną). Szczególnie interesująca jest obróbka cieplna niskotemperaturowa, stosowana głównie do stopów po ich hartowaniu, lub też do stopów surowych po odlaniu. Ten rodzaj obróbki cieplnej (wg [3, 4]) polega na wyżarzaniu surowego odlewu w temperaturach 400–500^oC (w niektórych przypadkach nawet do 650^oC) w czasie 4–12 godzin.

Taki sposób obróbki cieplnej żeliw chromowo-niklowych, mimo dużych korzyści technologicznych, jest dotychczas mało zbadany, a przez to mało stosowany. Praca niniejsza stanowi przyczynek do tej technologii.

Tabela 1. Wyniki pomiaru twardości w zależności od czasu wygrzewania i składu chemicznego

Nr wytopu	Skład chemiczny			Próba twardości [HRC]												
	C	Cr	Ni	czas [godz.]												
				0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1	1,96	12,0	1,11	44	47	52	52	62	62	62	59	59	58	60	62	59
2	1,7	12,8	1,6	41	42	43	44	44	47	56	55	58	59	59	54	51
3	1,79	12,1	1,88	41	43	44	47	52	62	61	59	58	57	58	59	62
4	1,88	19,7	1,09	46	48	48	49	49	50	50	57	54	55	52	50	49
5	1,79	19,1	1,64	47	47	47	47	48	47	49	51	49	53	47	48	48
6	2,0	18,5	2,11	46,5	48	49	49	49	48	51	52	52	51	52	50	48
7	2,34	13,8	1,08	46	50	53	60	63	64	61	60	60	60	61	62	64
8	2,67	13,4	1,59	50	51	52	54	60	63	63	63	62	62	62	63	66
9	2,75	13,4	2,09	51	51	53	56	65	66	63	63	63	62	63	64	66
10	2,67	19,3	1,06	55	55	56	57	57	57	56	58	59	59	59	58	59
11	2,63	19,3	1,6	54	55	55	56	56	56	56	58	59	58	57	57	57
12	2,57	19,1	2,14	54	54	55	55	56	56	56	57	57	56	56	56	56

Mn 1,0%; Si 1,0%; P 0,03%; S 0,03%

2. Badania własne

Badaniom poddano 12 wytopów żeliw chromowo-niklowych, w których zmieniano skład chemiczny zgodnie z planem: węgiel 2 lub 2,5%, chrom 12 lub 18% oraz nikiel 1,0, 1,5 lub 2%. Szczegółowy skład chemiczny poszczególnych wytopów zestawiono w tabeli 1.

Żeliwa wytapiano w 30-kilogramowym piecu indukcyjnym o częstotliwości 8500 Hz. Próbkę do badań o wymiarach 120 x 15 x 7 mm odlewano do form skorupowych. Próbkę tę cięto na mniejsze płytki (o wymiarach 20 x 15 x 7 mm), a następnie obrabiano je cieplnie. Obróbkę przeprowadzano w elektrycznym piecu mufowym w temperaturze 500°C. Z każdego wytopu ładowano do wygrzanego pieca 12 sztuk próbek i wyjmowano po jednej co 2 godziny chłodząc je na powietrzu. Po przeszlifowaniu mierzono na nich twardość metodą Rockwella (HRC). Średnie twardości z pięciu pomiarów zestawiono w tabeli 1.

Otrzymane wyniki (twardość i czas wyżarzania) stanowiły podstawę do sporządzenia wykresów $HRC = f(t)$ oraz do obliczeń statystycznych, a mianowicie do znalezienia funkcji przejścia. Funkcja ta ma postać [5]:

$$HRC = \frac{HRC_0}{\{1 - \exp[-z(tp - t)]\}} + HRC_{pocz.}, \quad (1)$$

gdzie

HRC_0 - przyrost twardości od wartości początkowej ($HRC_{pocz.}$) do maksymalnej - wyrażony w jednostkach HRC,

tp - czas, w którym zmiany twardości są najbardziej intensywne [godz.],

z - parametr określający intensywność wzrostu twardości [1/godz.],

HRC - twardość mierzona jako zmienna zależna,

$HRC_{pocz.}$ - twardość próbek surowych po odlaniu,

t - czas wyżarzania jako zmienna niezależna [godz.].

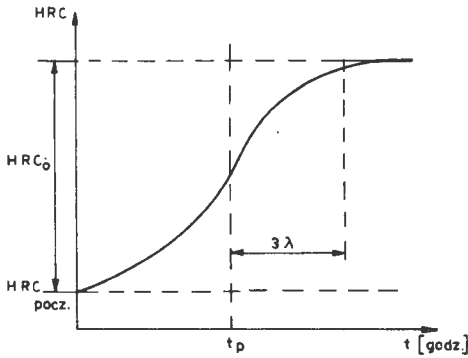
Krzywą zmian twardości jako funkcję przejścia przedstawia rysunek 1, a wartości parametrów HRC_0 , tp , z tej funkcji dla poszczególnych wytopów zestawiono w tabeli 2. Podano w niej również parametry statystyczne obliczonych zależności.

Parametry te pozwalają scharakteryzować efekt obróbki cieplnej oraz określić optymalny czas wygrzewania dla uzyskania 96% maksymalnej twardości. Czas ten oblicza się ze wzoru [5]:

$$t_{wygrz.} = tp + 3\lambda \quad [\text{godz.}], \quad (2)$$

gdzie

$$\lambda - \text{pasmo standardowe} = \frac{\ln(2 + \sqrt{3})}{z} \quad [\text{godz.}]$$



W dalszej części pracy znaleziono zależności pomiędzy parametrami funkcji przejścia a składem chemicznym i twardością początkową poszczególnych wytopów. Obliczenia te wykonano metodą regresji krokowej

Rys. 1. Funkcja przejścia dla $HRC = f(t)$

$$HRC_0 = 71,6 + 10,8 C - 0,71 Cr - 1,95 Ni - 1,44 HRC_{pocz.} \quad (3)$$

o parametrach statystycznych:

$$\Delta u = 1,74 \text{ HRC,}$$

$$R = 0,97,$$

$$W = 13,03,$$

$$F_{\text{kryt.}}(0,04; 4; 7) = 4,12,$$

- czas największej intensywności przyrostu twardości

$$t_p = 6,74 - 3,64 C + 0,64 Cr, \quad (4)$$

$$\Delta W = 1,89 \text{ godz.,}$$

$$R = 0,81,$$

$$W = 2,41,$$

$$F_{\text{kryt.}}(0,10; 2; 8) = 3,11,$$

- intensywność wzrostu twardości żeliwa

$$z = 1,37 - 0,095 Cr + 0,014 HRC_{pocz.} \quad (5)$$

$$\Delta z = 0,12 \text{ 1/godz.,}$$

$$R = 0,93,$$

$$W = 6,2,$$

$$F_{\text{kryt.}}(0,05; 2; 8) = 4,46,$$

Tabela 2. Parametry funkcji przejścia i ich parametry statystyczne

Nr wytopu	HRC _o [HRC]	tp [godz.]	Z [1/godz.]	F _{reg.}	F _{kryt.} (0,05; K-1; N-K-1)	S [HRC]	R
1	18,8	6,0	1,01	2735,2	6,94	1,11	0,99
2	17,7	10,7	0,58	1675	4,46	1,28	0,99
3	20,1	7,2	0,78	1115,09	5,79	1,65	0,98
4	10,7	10,9	0,24	1250	4,74	1,51	0,90
5	6,8	14,9	0,4	3757,8	4,74	0,8	0,93
6	7,65	10,8	0,19	3152,8	5,14	0,94	0,90
7	18,4	4,52	0,66	6689,6	9,55	0,75	0,99
8	13,23	6,93	0,86	10601	5,79	0,59	0,99
9	17,14	6,38	0,89	6586,3	9,55	0,77	0,99
10	5,01	10,6	0,23	7623,4	5,14	0,69	0,90
11	5,89	10,0	0,19	7794,3	5,14	0,67	0,90
12	2,68	7,15	0,38	2388,3	5,14	0,38	0,93

- czas prawie całkowitego przyrostu twardości

$$t_{96\%} = 2,5 \text{ Cr} - 19,8, \quad (6)$$

$$\Delta t_{96} = 3,5 \text{ godz.},$$

$$R = 0,93,$$

$$W = 6,52,$$

$$F_{\text{kryt.}}(0,05; 1; 9) = 5,12,$$

- czas początku wzrostu twardości

$$t_{4\%} = 13,3 - 3,97 \text{ C} + 30,9 \text{ Si} - 1,1 \text{ Cr}, \quad (7)$$

$$\Delta t_{04} = 0,78 \text{ godz.},$$

$$R = 0,99,$$

$$W = 50,49,$$

$$F_{\text{kryt.}}(0,05; 3; 5) = 4,35,$$

- twardość początkowa odlewu

$$\text{HRC}_{\text{pocz.}} = 16,1 + 9,4 \text{ C} + 0,68 \text{ Cr}, \quad (8)$$

$$\Delta \text{HRC}_{\text{pocz.}} = 0,98 \text{ HRC},$$

$$R = 0,98,$$

$$W = 24,6,$$

$$F_{\text{kryt.}}(0,05; 2; 8) = 4,46,$$

- twardość odlewu po obróbce cieplnej

$$\text{HRC}_{\max} = 66,3 + 5,98 C - 1,03 \text{ Cr} - 2,4 \text{ Ni}, \quad (9)$$

$$\Delta \text{HRC}_{\max} = 1,96 \text{ HRC},$$

$$R = 0,94,$$

$$W = 6,18,$$

$$F_{\text{kryt.}}(0,05; 3; 7) = 4,35.$$

3. Analiza wyników

Na podstawie otrzymanych wyników należy stwierdzić, że zgodnie z przewidywaniem, przeprowadzona obróbka cieplna powoduje podwyższenie twardości stopu. Wzrost ten jest tym wyższy, im niższa twardość była w stanie surowym (początkowym). Zależy ona wyłącznie od ilości węgla i chromu, a wzrost ich ilości powoduje zwiększenie ilości węglików, a tym samym następuje ogólny wzrost twardości stopu, co potwierdza równanie (8).

Czas wytrzymania dla początku wzrostu twardości (o blisko 4%) przedstawiono w równaniu (7), a czas, po którym następuje prawie pełne utwardzenie stopu (ok. 96%) - w równaniu (6). W równaniu zwraca uwagę to, że o szybkości decyduje wyłącznie ilość chromu.

W obliczonym wzorze na twardość maksymalną (9) występuje również i nikiel. Z równania wynika, że węgiel ma wpływ dodatni, natomiast chrom i nikiel ujemny. Oznacza to, że obniżenie zawartości chromu i niklu powoduje wzrost twardości. Uzasadnić to można działaniem tych pierwiastków na stabilizację austenitu. Obniżenie ich zawartości ułatwia przemianę austenitu w struktury iglaste.

Zastosowanie do obliczeń funkcji przejścia $\text{HRC} = f(t)$ pozwala na przewidywanie kinetyki procesu utwardzania się stopu wyłącznie na podstawie znajomości składu chemicznego. Podane wzory określające parametry HRC_0 , t_p , z - równania (3), (4), (5) pozwalają na skonstruowanie w sposób "uśredniony" zmian twardości występujących podczas obróbki cieplnej. Wszystkie obliczone równania regresji posiadają dobre parametry statystyczne, co pozwala je stosować w praktyce.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych prób można stwierdzić, że wzrost twardości żeliwa chromowo-niklowego w czasie niskotemperaturowej obróbki cieplnej można z dużą dokładnością wyznaczyć z funkcji przejścia $HRC = f(t)$. Jednocześnie pozwala to na określenie kinetyki zmian twardości w czasie wyżarzania. Podane równania pozwalają na określenie a priori wszelkich zmian tylko na podstawie znajomości składu chemicznego stopu, co ma duże znaczenie praktyczne.

Literatura

1. Maratray F., Usseglio-Nanot R.: Factors affecting the structure of Cr and Cr-Mo white irons, Climax Molybdenum, Paris 1972.
2. Maratray F., Bechet S.: Fundiciones blancas de alto cromo resistentes a la abrasion, Colada nr 9, vol. 12, 1979.
3. Dodd J., Parks J. L.: Factors affecting the production and performance of high Cr-Mo alloy iron castings, Climax Molybdenum, USA 1979.
4. Rörigh K., Bertolli C.: Le ghise martensitiche resistenti all'abrasione, Fonderia, nr 9-10, 1971.
5. Jura S., Jura Z., Jura J.: Aplikacja funkcji przejścia do opisu zjawisk (zbiorów) normalnych, Instytut Odlewnictwa Pol. Śl. (praca nie publikowana).