

Jerzy CYBO, Stanisław JURA, Marian PRZYBYŁ, Jerzy CHMIELA, Grzegorz SŁUŻALEK
Instytut Odlewnictwa, Politechnika Śląska
Instytut Problemów Techniki, Uniwersytet Śląski

PROFIL TWARDOŚCI PRZEKROJU POPRZECZNEGO JEDNOLITYCH WALCÓW ŻELIWNYCH

Streszczenie. W pracy podano technologię wytapiania i skład chemiczny niskostopowego żeliwa chromowo-niklowego oraz zakresy wyników pomiarów i obliczeń twardości walców. Omówiono także możliwość zastosowania do analitycznego opisu zmian HB funkcji trzyparametrycznej. Określa ona twardość w dowolnym punkcie przekroju, a jej parametrami są: przyrost twardości od rdzenia walca do powierzchni beczki, odległość do warstwy o maksymalnej intensywności zmian HB oraz intensywność obniżenia twardości. Podano także związki liczbowe między niektórymi obliczeniowymi i pomiarowymi parametrami twardości.

THE HARDNESS SECTION OF UNIFORM CAST IRON ROLLS CROSS-SECTION

Summary. In this work we present the steelmaking practice and chemical composition of chromium-nickel low-alloy cast iron as well as the results of research (and computations) on roll's hardness. We consider also the possibility of application the three-parametric function for the analytic description of HB changes. This function allows to define the hardness in any point of cross-section and has the following parameters: the hardness increase from the roll's core to working barrel surface, distance to 0 layer with the maximum intensity of HB changes as well as the intensity of hardness decrease. There have been also given the number of relations between some of computational and measuring hardness parameters.

HÄRTEPROFIL DES QUERSCHNITTS VON HOMOGENEN GÜBEISENWÄLZEN

Zusammenfassung. In vorliegender Arbeit wurden Schmelztechnologie und Chemischezusammensetzung des niedriglegierten Chrom-, Nickelgußes und Ergebnisse von der Härtemessungen (und Beschätzungen) von den Wälzen dargestellt. Zusätzlich wurde auch die Möglichkeit der Benutzung von Dreiparametergleichung für die Beschreibung des

Härteverlaufes besprochen. Mit der Gleichung könnten man die Härte im beliebigen Punkt ermitteln. Parametern von der Gleichung sind:

- Härtezunahme von dem Kern ausgehend bis zur Oberfläche der Walze,
- Abstand zwischen der Oberfläche und der Schicht, die maximale Intensität der Brinellhärteabwechslung aufweist,
- Intensität der Härteabnahme.

Sind auch die qualitativen Abhängigkeiten zwischen den gemessenen und ermittelten Härteparametern besprochen.

1. CEL I TREŚĆ PRACY

Przedmiotem badań są walce żeliwne jednolite. Podstawowym wskaźnikiem ich jakości użytkowej jest twardość. Dotychczas parametr ten był odnoszony tylko do powierzchni roboczej beczki walca. Nie znano natomiast przebiegu zmian twardości wzdłuż promienia przekroju beczki ani grubości warstwy utwardzenia. Ze względu na istotne znaczenie tych wielkości dla zachowania właściwych warunków pracy i żywotności walców celem niniejszych badań było analityczne określenie zmian twardości (profilu twardości) w warstwie utwardzenia oraz uzyskanie jak najszerzej charakterystyki funkcyjnej (liczbowej) tej warstwy. Takie ujęcie umożliwia zarazem pełniejszą analizę oddziaływania składu chemicznego¹⁾ żeliwa na twardość i jej zmiany w dowolnym punkcie przekroju beczki, a przede wszystkim pozwala powiązać te ostatnie ze zmianami struktury jako konsekwencją zmiennych warunków krzepnięcia na przekroju odlewu walca. Ułatwia także prognozowanie przed spustem ciekłego stopu, profilu twardości walca metodą analizy termicznej i derywacyjnej, pozwalając tym samym na ewentualną korektę składu w celu uzyskania właściwych parametrów warstwy utwardzenia¹⁾.

2. ŻELIWO NA WALCE ORAZ BADANIE TWARDOŚCI

Żeliwo na walce uzyskano metodą przetapiania w kwaśnym piecu indukcyjnym o pojemności 2,5 Mg. Głównymi składnikami wsadowymi były: złom obiegowy i wióry stopowego żeliwa sferoidalnego, złom stalowy oraz surówka Sorel. Nawęglanie kąpieli prowadzono przy użyciu mielonej elektrody grafitowej. Żelazostopy wprowadzano 60 min przed spustem. Badaniu poddano walce z 30 wytopów o zakresie zmian składu chemicznego żeliwa podanym w tabl. I.

¹⁾ Zagadnienie to przedstawiono w pracy pt. "Oddziaływanie składu chemicznego na zmiany twardości jednolitych walców żeliwnych".

Tablica 1

Zakresy zmienności składu chemicznego zeliwa na walcie

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
3,22	0,59	1,12	0,05	0,027	1,22	1,22	0,22
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
3,40	0,72	1,32	0,10	0,038	1,52	1,35	0,50

Materiał do badania twardości pobierano z beczki walca²⁾ według schematu przedstawionego na rys.1. Pomiary HB prowadzono wzdłuż promienia w sześciu miejscach oddalonych od siebie o 5mm, rys.2. Dla każdej warstwy wykonywano po trzy odciski określające wartość średnią HB1-HB6. Równocześnie zmierzono twardość na powierzchni beczki (HB_b) i czopa³⁾ (HB_c). Wymienione pomiary (HB5/750) wykonywano wg PN-78/H04350. Ponadto dokonano pomiaru twardości powierzchni beczki (HBB_b) i czopa (HBB_c) dynamiczną metodą Baumana. Zakresy zmienności wyników podano w tabl.2⁴⁾.

Tablica 2

Zakresy zmienności pomiarów HB

HBB _b	HB _b	HB1	HB2	HB3	HB4	HB5	HB6	HB _c	HBB _c
440	400	370	350	340	335	335	330	265	250
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
465	440	420	415	410	395	390	385	295	350

3. FUNKCYJNY OPIS ZMIAN TWARDOŚCI (PROFILU HB) NA PRZEKROJU BECZKI WALCA

W celu analitycznego opisu zmian twardości na przekroju beczki walca zastosowano funkcję (1) [1,2], rys.3:

$$HB(g) = \frac{U}{1 + \exp[Z(g - W)]} + HB_c, \quad (1)$$

gdzie:

HB(g) - twardość beczki walca w dowolnym punkcie przekroju odległym o "g" od obrobionej powierzchni beczki,

HB_c - twardość na powierzchni czopa (i w rdzeniu walca patrz przypis 3),

U, W, Z - parametry funkcji profilu twardości walca,

²⁾ Walce podlegały po odlaniu wyżarzaniu odprężającemu: nagrzewanie do 380 - 400°C z $V = 15^\circ\text{C/h}$, chłodzenie: 20h - do 180°C, 24h - do 70°C, 12h do temperatury otoczenia.

³⁾ Badania HB na przekroju czopa nie wykazywały istotnych różnic twardości w stosunku do powierzchni czopa. Pozwala to stosować zamienne pojęcie: twardość rdzenia walca.

⁴⁾ Pełnego zestawienia wartości pomiarowych (tabl. 1,2) i obliczeniowych (tabl. 3) nie zamieszcza się ze względu na ograniczoną objętość pracy.

- U [jednostki HB] - przyrost twardości od rdzenia walca do surowej powierzchni beczki,
 W [mm] - odległość od obrobionej powierzchni beczki do warstwy, w której zachodzą najintensywniejsze zmiany twardości,
 Z [mm⁻¹] - intensywność zmian twardości, określająca szerokość pasma najintensywniejszych zmian twardości: $2L = 2 \ln(2 + \sqrt{3}) / Z$, rys.3

Graficzny związek parametrów funkcji (1) ze zmianami profilu HB ujęto na rys.4. Wzrostowi wartości U, W odpowiada poprawa twardości na całym przekroju beczki, a wzrostowi Z - poprawa HB od jej powierzchni do punktu najintensywniejszych zmian twardości, odległego od tej powierzchni o W.

Parametry U, W, Z są wyznaczone numerycznie (metodą aproksymacji, tabl.3) na podstawie wcześniejszych pomiarów twardości HB1-HB6 oraz HBc. Podkreślić należy bardzo dużą zgodność dla wszystkich badanych walców z 30 wytopów wielkości obliczeniowych z twardością zmierzoną. Wyrazem tego jest duża wartość współczynników korelacji ($R \geq 0,99$) oraz mała wartość odchylenia standardowego ($S < 8$). Przykładowy przebieg zmian twardości obliczony wg (1) przedstawia na rys. 5 linia ciągła; linie przerywane są prowadzone w odległości ± 1 odchylenia standardowego; punkty - wartości pomiarowe HB.

Wymienione parametry U, W, Z profilu HB określają w sposób jednoznaczny przebieg zmian twardości wzdłuż promienia przekroju beczki walca, pozwalając obliczyć HB w dowolnym jego punkcie. Stanowią tym samym pełną i wystarczającą charakterystykę warstwy utwardzenia. Ewentualne, dalsze rozszerzenie tej charakterystyki można uzyskać analizując skrajne punkty zakresu zmian twardości. Analityczną miarą ich usytuowania jest wartość potrójnego pasma L (p.rys.3). Pozwala to obliczyć położenie warstwy w stosunku do obrobionej powierzchni beczki, w której występuje minimalna i maksymalna twardość:

$$g_{\min}(HB_{\min}) = W + 3L \quad (2)$$

$$g_{\max}(HB_{\max}) = W - 3L \quad (3)$$

Wstawiając do funkcji (1) w miejsce g wartość g_{\min} , g_{\max} lub W, oblicza się twardości ekstremalne (HB_{\min} , HB_{\max}) lub twardość HB_w warstwy (odległej o W od obrobionej powierzchni beczki), w której zachodzą najintensywniejsze zmiany twardości. Zakresy wartości podano w tabl. 3.

Tablica 3

Zakres zmienności parametrów funkcji (1) oraz wielkości obliczonych

U [jedn.HB]	W [mm]	Z [mm ⁻¹]	L [mm]	HB _w	HB _{max}	HB _{min}
128	14,2	0,0353	18,1	350	440	265
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
189	34,7	0,0780	37,3	375	465	300

Reasumując należy stwierdzić, że zaproponowana funkcja (1) zapewnia pełny i dokładny opis profilu twardości beczki, wskazując zarazem, iż zmiany HB na przekroju walca mają charakter tzw. logistycznego prawa wzrostu [3]. Zgodnie z zasadami statystyki,

dla uzyskania tej funkcyjnej charakterystyki zmian HB, czyli wyznaczenia parametrów U, W, Z, wystarczy dokonać pomiaru twardości w 5 punktach wzdłuż promienia przekroju, co zapewni dostateczną dokładność i wiarygodność opisu profilu HB.

3.1. Statystyczna współzależność między niektórymi wskaźnikami twardości

Wstępna analiza wartości⁵⁾ HB_{max} , HB_b , HB_c+U , HB_{min} i HB_c wskazuje - zgodnie z oczekiwaniami - na zbieżność liczbową między trzema pierwszymi i dwoma ostatnimi parametrami. Sugeruje to celowość określenia liczbowego związku między tymi wielkościami⁶⁾. Ujmują go relacje (4)-(7) w tabl. 4

Tablica 4

Współzależność między obliczeniowymi i pomiarowymi wskaźnikami twardości

Nr rów.	Treść równania	R	S	α
4	$HB_{max}(g_{max})=0,976(HB_c+U)+7$	0,999	0,3	0,001
5	$HBB_b = HB_c+U$	0,98	2,7	0,001
6	$HBB_b = HB_{max} - 7$	0,98	2,7	0,001
7	$HB_{min}(g_{min})=0,993HB_c+5$	0,999	0,2	0,001
* Oznaczenie parametrów HB podano w tekście rozdz. 2 i 3.				
** R, S, α - współczynnik korelacji, odchylenie standardowe i poziom istotności równań.				

Zależności (4)-(7) świadczą o możliwości zamiennej analizy opisujących je parametrów. Zależnie od potrzeb można zrezygnować z rozważenia np. HB_{min} , HB_{max} na korzyść parametrów HB_c , HB_c+U , HBB_b lub odwrotnie.

4. PODSUMOWANIE

Opracowana i zaproponowana do opisu zmian twardości na przekroju becзки funkcja w pełni charakteryzuje profil twardości walca. Parametry U, W, Z tej funkcji pozwalają obliczyć rzeczywistą twardość w dowolnej warstwie przekroju poprzecznego becзки. Jednocześnie charakteryzują one: przyrost twardości od rdzenia do powierzchni becзки, intensywność zmian HB, szerokość pasma najintensywniejszych zmian HB, usytuowanie oraz twardość warstwy o najintensywniejszych zmianach HB, usytuowanie warstw i ich twardości ekstremalne. Te obliczeniowe parametry stanowią kompleksową charakterystykę warstwy utwardzenia walców żeliwnych.

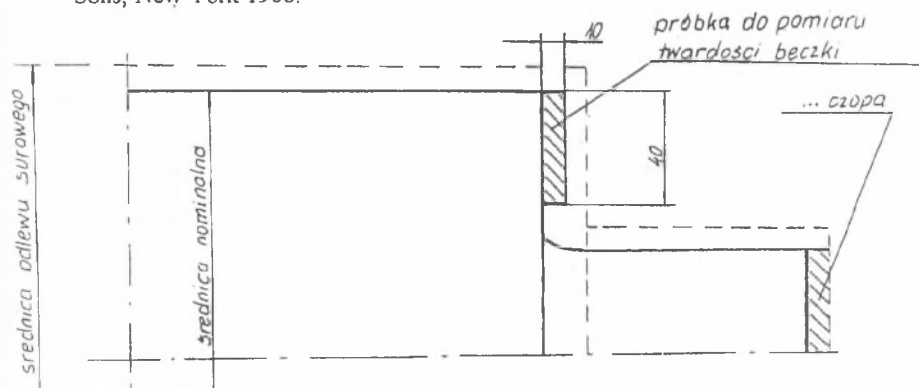
⁵⁾ Uwaga jak w przypisie 4.

⁶⁾ Nie stwierdzono natomiast liczbowego związku między pomiarami twardości Brinella (met. statyczna) i Baumana (met. dynamiczna). Należy sądzić, że jest to wynikiem zróżnicowania metodyki badawczej w obu przypadkach.

Jest oczywiste, że przedstawione zmiany twardości na przekroju beczki walca są przede wszystkim wynikiem zmiennych warunków krzepnięcia kolejnych warstw tego odlewu. Ich bezpośrednią konsekwencją jest zmienna struktura na przekroju walca, która kształtuje jego twardość. Struktura odlewu jest jednak zarazem funkcją składu chemicznego żeliwa. Ze względu na stosunkowo niewielkie możliwości (w chwili obecnej) efektywnego sterowania przebiegiem krystalizacji na przekroju walca w pierwszej kolejności powinna znaleźć rozwiązanie problematyka oddziaływania na zmiany twardości za pomocą regulacji składu chemicznego żeliwa. Z tego też względu zagadnienie to stanowi treść pracy pt. "Oddziaływanie składu chemicznego na zmiany twardości jednolitych walców żeliwnych".

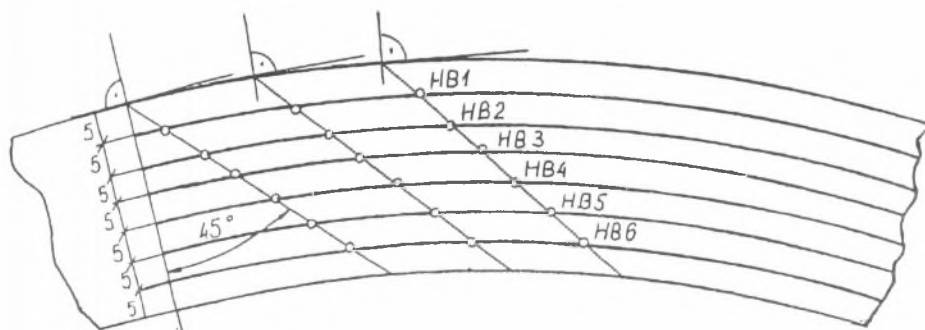
LITERATURA

- [1] Cybo J.: Prace UŚI., Mechanika 22, 48, Katowice 1985.
- [2] Cybo J., Jura S.: Inżynieria Materiałowa 1, 21 (1986).
- [3] Feller W.: An introduction to probability theory and its applications. Publ. J. Wiley a. Sons, New York 1966.



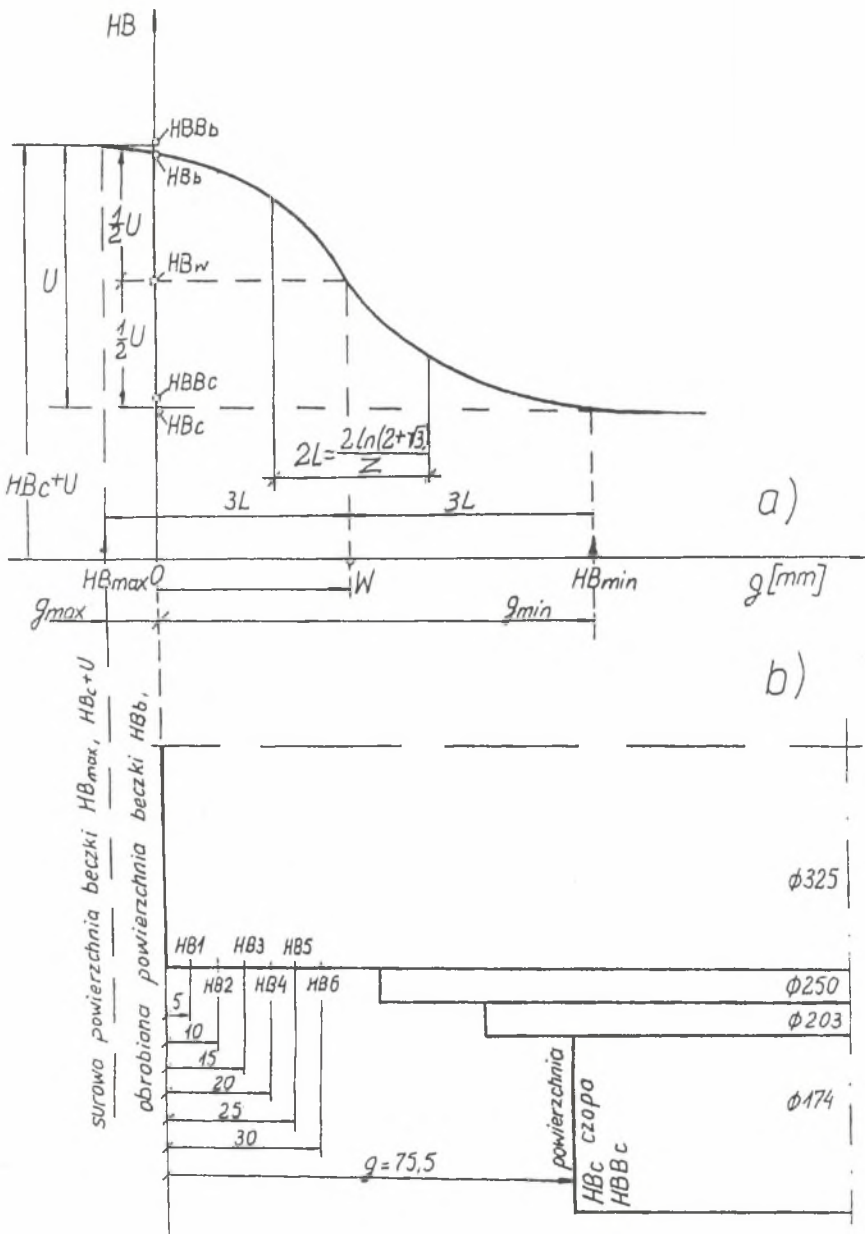
Rys. 1. Schemat pobierania materiału do badania twardości walca

Fig. 1. A diagram of sampling the material for roll hardness testing



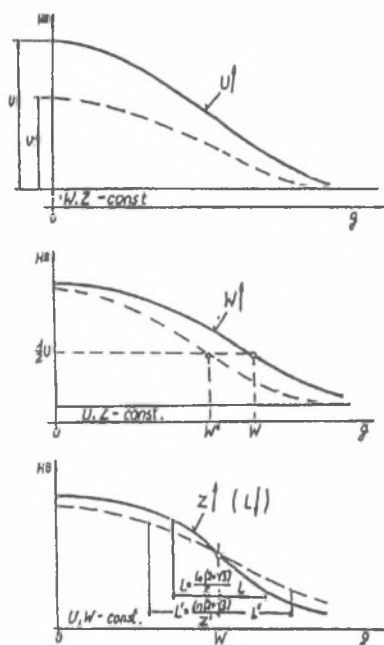
Rys. 2. Schemat pomiaru twardości na przekroju walca

Fig. 2. A diagram of hardness measurement at the roll section

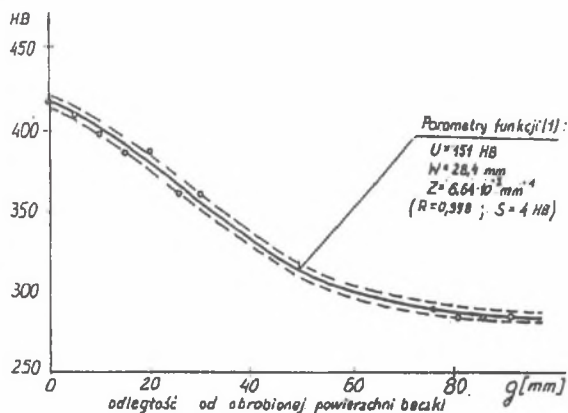


Rys. 3. Graficzna interpretacja funkcji profilu twardości walca i jej parametrów - a); punkty pomiarowe HB walca - b).

Fig. 3. Diagrammatic interpretation of the function of roll hardness section and its parameters - a); measuring points on HB roll - b)



Rys.4. Zmiany profilu twardości w wyniku wzrostu wartości parametrów U, W, Z funkcji (1)
 Fig. 4. Changes in hardness section resulting from the increase of values of U, W, Z parameters for the function (1)



Rys.5. Przykładowy kształt krzywej zmian twardości na przekroju walca nr 11814, opisany funkcją (1)

Fig. 5. An exemplary shape of the curve for hardness variations at the roll section No.11814 described by the function (1)

Abstract

The basic coefficient for the functional quality of uniform cast iron rolls is hardness. This parameter has been so far referred only to the working surface of barrel. On the other hand, neither the thickness of hardening case was known nor the course of hardness variations, called an HB section, along the roll radius, which changes are the requisite of proper operating parameters and appropriate life of these castings. Considering essential importance of above-mentioned quantities, analytical description has been proposed in the work for the hardness changes on the section of roll barrel using three-parametric function. It determines HB at any point on the roll radius and its parameters are: hardness increment from the core towards the barrel surface $/U/$, a distance $/W/$ to a case with the maximum intensity of changes in HB and the intensity of hardness drop $/Z/$. Simultaneously it makes possible to calculate a width of band with most intensive HB changes, a location and hardness of case indicating the largest HB variations and a position of cases that have extreme hardnesses. The above solution was verified for rolls coming from 30 melts of low-alloy chromic-nickel cast iron. In this work, it has been also pointed to statistical relation between some measuring and analytical hardness coefficients. Using the analytical description of the hardness section of roll cross-section practically resolves itself into numerical determination of the three parameters U, W, Z on the basis earlier HB measurements at 5 points along the barrel radius.

The presented characteristic of numerical effects of using the discussed description of hardness changes shows a possibility to make a more comprehensive analysis of the effect of cast iron chemical constitution on HB and its changes at any point of roll section, on the connection of the latter ones with changes in structure - as a consequence of variable solidification conditions in successive barrel cases - and also to facilitate, prior to metal tapping, forecasting of the hardness section employing the ATD method. These subjects are amplified in the study titled "The Influence of Chemical Constitution of Cast Iron on Hardness Changes of Uniform Rolls".

Recenzent: Prof. dr hab. inż. A. Maciejny

Wpłynęło do Redakcji w lipcu 1994 r.