

# Annales Universitatis Paedagogicae Cracoviensis

Studia Technica IV (2011)

*Ireneusz Telejko, Henryk Adrian, Renata Staśko,  
Katarzyna Pakiet, Marcin Pakiet*

## **Badanie hartowności niskostopowego staliwa konstrukcyjnego**

Zagadnienie doboru materiału, dającego gwarancję bezpiecznej pracy projektowanej części, sprowadza się do ustalenia koniecznego minimum istotnych właściwości, a następnie znalezienie materiału, który spełnia te wymagania przy najmniejszym koszcie. Określenie koniecznego minimum właściwości wymaga znajomości warunków pracy danej części na podstawie obliczeń konstrukcyjnych, uprzedniego doświadczenia lub prób praktycznych.

Najczęściej maszyny i urządzenia narażone są na obciążenia mechaniczne, środowisko w którym pracują nie jest agresywne pod względem chemicznym, a temperatura pracy mieści się w zakresie 40–300°C. Materiały takie kwalifikuje się jako materiały konstrukcyjne.

Uważa się, że wystarczającą charakterystyką materiałów konstrukcyjnych są ich właściwości mechaniczne. Spośród odlewniczych stopów metali najważniejszym materiałem konstrukcyjnym jest staliwo. Powszechnie stosowanym sposobem badania właściwości mechanicznych staliwa jest próba rozciągania. Wielkości określone z wykresu w próbie rozciągania: umowna granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie – uważa się za miarę wytrzymałości materiału, natomiast wydłużenie i przewężenie są miarami ciągliwości. Inne ważniejsze właściwości mechaniczne to: twardość, udarność, odporność na zmęczenie, wytrzymałość na ściskanie, zginanie, skręcanie. Uważa się, że znajomość wymienionych właściwości jest wystarczająca dla prawidłowego doboru materiału na określony wyrób.

### **Hartowność jako kryterium doboru gatunku staliwa konstrukcyjnego**

Wymieniony zestaw informacji o staliwie nie uwzględnia bardzo ważnego, niekiedy decydującego wymogu: dobór gatunku staliwa powinien zapewnić właściwości mechaniczne zapobiegające skutkom działania naprężeń o określonej wartości, jakie powstają w czasie pracy w strefie materiału w stanie odlanym leżącego na określonej głębokości pod jego powierzchnią. Staliwo o strukturze składającej się z kulistego, o dużym stopniu dyspersji cementytu, równomiernie rozmieszczonego w ferrycie charakteryzuje się najlepszym połączeniem właściwości wytrzymałościowych i plastycznych, a także największym stosunkiem  $R_e/R_m$ , który jest bardzo ważnym wskaźnikiem jakości materiałów konstrukcyjnych. Taką strukturę można

uzyskać tylko za pośrednictwem martenzytu. Jedynie w przypadku zahartowania na martenzyt staliwo po odpuszczaniu w niskiej temperaturze ma największą twardość, po odpuszczaniu w wysokiej – najlepszą ciągliwość. Gdy struktura staliwa po operacji hartowania nie jest martenzytyczna, granica plastyczności po odpuszczaniu przy tej samej wytrzymałości i twardości jest niższa (a tym samym niższy stosunek  $R_e/R_m$ ) niż wówczas, gdy po hartowaniu otrzymuje się martenzyt. Na rodzaj struktury po hartowaniu, podobnie jak granica plastyczności reaguje przewężenie, a w jeszcze silniejszym stopniu udarność. Przy zmianie struktury ze 100 do 80% martenzytu obniżenie właściwości mechanicznych nie jest duże, ale przy strukturze zawierającej mniej niż 50% martenzytu obniżenie może być bardzo znaczne. Ogólnie można stwierdzić, że im większa jest zawartość martenzytu w strukturze hartowanego staliwa, tym lepsze są jego właściwości mechaniczne po odpuszczeniu. Przez hartowanie i różne temperatury odpuszczania można uzyskiwać różne właściwości tego samego staliwa, odpowiednio do wymagań odpowiadających warunkom pracy tej czy innej części.

Zdolność staliwa do tworzenia struktury martenzytycznej w procesie hartowania nazywa się hartownością. Określa ona, jak głęboko można zahartować staliwo na martenzyt. Jeżeli ścianka odlewu nie jest zahartowana na wskroś na martenzyt i zamiast martenzytu występują w jej rdzeniu produkty dyfuzyjnego rozpadu przechłodzonego austenitu, to wystąpi niejednorodność właściwości mechanicznych na przekroju ścianki. Właściwości mechaniczne stref zewnętrznych zahartowanych na martenzyt są wyższe od właściwości mechanicznych w rdzeniu.

W temperaturze pokojowej lub nieznacznie się od niej różniącej właściwości mechaniczne różnych gatunków staliwa konstrukcyjnego zahartowanego na martenzyt i następnie odpuszczonego do tej samej twardości wykazują tylko niewielkie różnice (są praktycznie jednakowe), niezależnie od składu chemicznego stali. Dostateczna hartowność (wymagana zawartość martenzytu w strukturze po hartowaniu) w ogromnej większości zastosowań praktycznych zapewnia otrzymanie podstawowych właściwości mechanicznych staliwa w stanie ulepszonym cieplnie, wystarczających dla normalnych wymagań konstrukcyjnych. Obróbka cieplna staliwa o niedostatecznej hartowności nie pozwala uzyskać w środkowych warstwach wyrobu maksymalnych dla danego staliwa właściwości mechanicznych; może to obniżyć wartość użytkową przedmiotu z tego staliwa. Jednocześnie zwiększenie hartowności pociąga za sobą większe zużycie pierwiastków stopowych; zbyt duża hartowność to marnotrawstwo pierwiastków stopowych i niepotrzebne powiększenie kosztu wyrobu.

Z przedstawionych rozważań wynika, że znajomość hartowności umożliwia najwłaściwszy dobór składu chemicznego staliwa stosowanego na części maszyn i urządzeń. Znajomość hartowności jest wprost niezbędna dla doboru gatunku staliwa na określony wyrób aby, w zależności od wymiarów i kształtu wyrobu, otrzymać strukturę odpuszczonego martenzytu w założonym przekroju (w całym albo tylko w jego części) hartowanego przedmiotu. Zawartość pierwiastków stopowych w staliwie nie powinna być większa niż konieczna dla zapewnienia hartowności dostosowanej do wymiarów przedmiotu i sposobu hartowania. Jeżeli rozkład naprężeń w przekroju pracującej części jest taki, że naprężenia, największe w warstwie powierzchniowej zmniejszają się w kierunku do jego środka, można stosować staliwo

o hartowności mniejszej, ale dostatecznej dla zapewnienia właściwości odpowiednich do obciążenia poszczególnych części przekroju.

Miarą hartowności jest idealna średnica krytyczna  $D_i$ , to jest maksymalna średnica pręta, przy której po zahartowaniu w ośrodku o nieskończenie dużej zdolności chłodzącej uzyskuje się w osi pręta strukturę o określonej zawartości martenzytu, lecz nie mniejszej niż 50%. Struktura półmartenzytyczna ma szczególne znaczenie dlatego, że zawartość 50% martenzytu w środku przekroju jest wystarczająca dla większości zastosowań praktycznych staliwa. Bardzo przydatnym miernikiem liczbowym, służącym do porównania hartowności różnych gatunków staliwa, jest średnica krytyczna  $D_k$ , to jest średnica pręta o strukturze rdzenia półmartenzytycznej hartowanego w ośrodku o znanej zdolności chłodzącej. Średnicę krytyczną wyznacza się metodą doświadczalną lub obliczeniową.

Metodą doświadczalną stosowaną do stali i staliw konstrukcyjnych jest próba hartowania od czoła [1]. Według powszechnie akceptowanej metody obliczeniowej, opracowanej w 1942 roku przez Grossmanna [2], wpływ pierwiastków stopowych i wielkości ziarna austenitu na wartość idealnej średnicy krytycznej oblicza się za pomocą określonych doświadczalnie współczynników hartowności. Niewątpliwą zaletą metody obliczeniowej jest krótki czas i niski koszt uzyskania wyników. Metoda ma jednak zasadniczą wadę; wpływ tego samego pierwiastka na hartowność jest różny i zależy od składu chemicznego stali. Jest to zrozumiałe, ponieważ pierwiastki stopowe rozpuszczone w austenicie oddziałują wzajemnie na aktywność chemiczną, a przez to na kinetykę rozpadu austenitu. W literaturze opublikowano dużą liczbę różniących się danych dotyczących wpływu składu chemicznego stali na wartość idealnej średnicy krytycznej. Ich obszerny przegląd przedstawił Doane [3]. Stal jest materiałem przerobionym plastycznie, jej struktura wykazuje znaczne różnice w stosunku do staliwa o tym samym składzie chemicznym - materiału w stanie lanym, nie poddanego przeróbce plastycznej. Powstaje zatem pytanie, czy dane literaturowe do obliczania hartowności stali można przenosić na staliwo. Celem pracy było sprawdzenie, czy publikowane dane do obliczania  $D_i$  stali konstrukcyjnych mogą być stosowane do przewidywania hartowności staliwa, oraz dobór tych danych dla zapewnienia zgodności obliczeń z pomiarami hartowności staliwa.

## **Materiał i metodyka badań**

Do przeprowadzenia badań zostały wykorzystane dwa gatunki staliwa konstrukcyjnego L20HM oraz L20G. Staliwo wytapiano w 7-tonowym piecu elektrycznym łukowym o wyłożeniu zasadowym według technologii z pełnym utlenieniem. Spust stali o temperaturze 1630°C przeprowadzono do kadzi wyłożonej materiałem ogniotrwałym kwaśnym. Do kadzi dodano 1 kg/Mg aluminium w celu odtlenienia staliwa. Następnie z kadzi odlano wlewki próbne o kształcie trójlistnej koniczynki według normy PN-76/H-04309. Wlewki zostały poddane procesowi wyżarzania normalizującego w temperaturze 850°C. Skład chemiczny wytopionych gatunków staliwa podano w tabeli 1.

**Tab. 1.** Skład chemiczny badanych gatunków staliwa

Gatunek staliwa	Skład chemiczny (%)											
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Al	V	Nb
L20HM	0,17	0,60	0,50	0,019	0,011	0,62	0,11	0,39	0,003	0,14	0,003	0,004
L20G	0,25	1,16	0,56	0,014	0,029	0,07	0,08	0,05	0,03	0,05	–	–

Z wlewków próbnych przygotowano standardowe próbki do pomiaru hartowności metodą Jominy'ego. Nagrzewanie próbek przeprowadzono w komorowym piecu elektrycznym z atmosferą ochronną argonu. Oznakowane próbki austenitzowano w dwóch temperaturach: 920 oraz 1020°C. Czas wygrzewania próbek w piecu wynosił 30 minut. Próbki wyciągnięte z pieca przeniesiono do urządzenia do badania hartowności w czasie nie dłuższym niż 5 sekund i poddano próbie hartowania od czoła. Po procesie hartowania, w celu dokonania pomiarów twardości, zostało wykonane szlifowanie czterech równoległych do osi próbki powierzchni na głębokość 0,5 mm. Powierzchnie na których badano twardość były przesunięte względem siebie o kąt 90°. Do pomiarów został użyty twardościomierz Rockwella.

Z próbek Jominy'ego wycięto odcinki o długości 30 mm od czoła, które zostały poddane automatycznemu szlifowaniu oraz polerowaniu przy użyciu szlifierko-polerki Struers TegraPol-11. Aby ujawnić granice ziarn byłego austenitu staliwa, próbki trawiono w nasyconym wodnym roztworze kwasu pikrynowego z dodatkiem środka zmniejszającego napięcie powierzchniowe. Czas trawienia wynosił 25–30 min. Powierzchnie zgładów obserwowano, wykorzystując mikroskopy świetlne: Nikon, Olympus i Leica. Zarejestrowane obrazy zostały wykorzystane do ilościowej oceny długości cięciw ziarn byłego austenitu przy pomocy programu komputerowego Sigma Scan Pro [4].

Do obliczenia idealnej średnicy krytycznej oraz sporządzenia krzywej hartowności badanych gatunków staliwa wykorzystano program komputerowy Har\_Temp, opisany w pracy [5]. Program służy do obliczania idealnej średnicy krytycznej metodą analityczną Grossmanna oraz pozwala na obliczanie krzywej hartowności. W programie wykorzystuje się dane [2; 6–8] dotyczące wpływu pierwiastków stopowych na wartość idealnej średnicy krytycznej, informacje o wpływie zawartości węgla na twardość struktur zawierających 50–100% martenzytu [9], zależność pomiędzy idealną średnicą krytyczną a odległością od chłodzonego czoła strefy półmartenzytycznej [10]. Ponadto opierając się na danych [11–14] można obliczyć krzywą hartowności na podstawie znajomości wartości  $D_i$  oraz krzywą rozkładu twardości na przekroju pręta o założonej średnicy, chłodzonego z temperatury austenitzowania w ośrodku o znanej intensywności chłodzenia przeprowadza się, wykorzystując dane Craftsa i Lamontsa [15].

## Wyniki badań

### Pomiary twardości

W celu wyznaczenia odległości od czoła strefy półmartenzytycznej  $l_k$ , dokonano pomiarów rozkładu twardości względem odległości od ciała na czterech uprzednio zeszlifowanych powierzchniach próbki Jominy'ego. Dla każdej odległości od czoła obliczono wartość średnią twardości  $HRC_{sr}$ . Wyniki pomiarów zamieszczono w tabelach 2–5.

**Tab. 2.** Wyniki pomiarów twardości na próbkach Jominy'ego ze staliwa L20HM po hartowaniu w temperaturze 920°C

l (mm)	HRC <sub>1</sub>	HRC <sub>2</sub>	HRC <sub>3</sub>	HRC <sub>4</sub>	HRC <sub>sr</sub>
1,5	45	44,5	54,5	54	44,75
3	44,5	43,5	41	52,5	44,00
5	41,5	39	36	64	40,25
7	37	33,5	44	40,5	35,25
9	32,5	32	30	36,5	32,25
11	29,5	29	29	33,5	29,25
13	27,5	28	25	29	27,75
15	26,5	26	23,5	26	26,25
20	23	24,5	30	25	23,75
25	22,5	22	33	21	22,25
30	20,5	21,5	20	24	21,00
35	20,5	21	29,5	18	20,75
40	20	19,5	40	18,5	19,75
45	19,5	19	17	17	19,25
50	19	18	18	16	18,50

**Tab. 3.** Wyniki pomiarów twardości na próbkach Jominy'ego ze staliwa L20HM po hartowaniu w temperaturze 1020°C

l (mm)	HRC <sub>1</sub>	HRC <sub>2</sub>	HRC <sub>3</sub>	HRC <sub>4</sub>	HRC <sub>sr</sub>
1,5	46,5	46,5	52,5	42,5	47,00
3	46,5	46,5	41,5	41	43,88
5	43,5	41	39	37,5	40,25
7	40	37,5	34,5	34,5	36,63
9	37	34	32	32	33,75
11	35	32,5	30	30	31,88
13	33	31	27	27,5	29,63
15	32	30,5	28	27	29,38
20	30,5	27	25	25	26,88
25	29,5	27	24	24	26,13
30	29,5	26	22,5	23,5	25,38
35	26	25,5	22	22	23,88
40	26	24,5	21,5	21,5	23,38
45	25	25,5	21	21,5	23,25
50	24,5	24	20,5	22	22,75

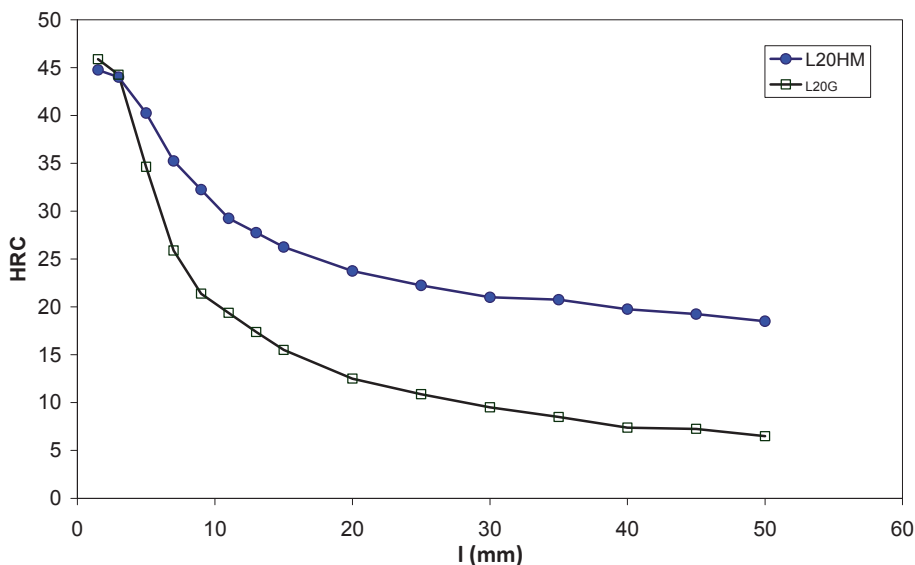
**Tab. 4.** Wyniki pomiarów twardości na próbkach Jominy'ego ze staliwa L20G po hartowaniu w temperaturze 920°C

l, mm	HRC <sub>1</sub>	HRC <sub>2</sub>	HRC <sub>3</sub>	HRC <sub>4</sub>	HRC <sub>5r</sub>
1,5	49	49	43,5	42	45,88
3	48	47	42	40	44,25
5	36	38,5	33	31	34,63
7	27	28	24	24,5	25,88
9	22	23	20,5	20	21,38
11	20,5	20	19	18	19,38
13	18,5	19	16	16	17,38
15	17	17	14	14	15,50
20	13,5	13,5	11,5	11,5	12,50
25	12,5	11,5	10	9,5	10,88
30	10	10	9	9	9,50
35	9,5	9	8,5	7	8,50
40	9	7,5	7	6	7,38
45	8,5	7,5	7	6	7,25
50	8,5	6	6	5,5	6,5

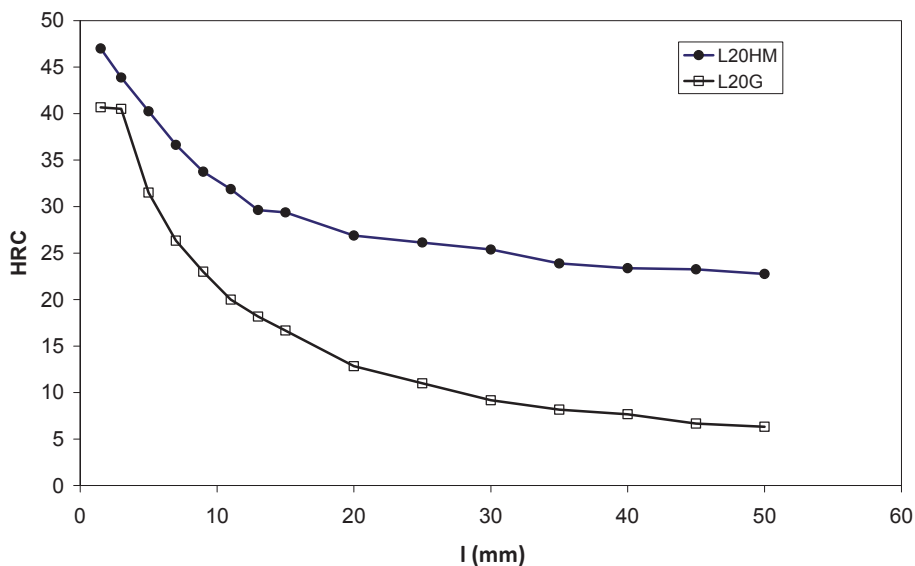
**Tab. 5.** Wyniki pomiarów twardości na próbkach Jominy'ego ze staliwa L20G po hartowaniu w temperaturze 1020°C

l, mm	HRC <sub>1</sub>	HRC <sub>2</sub>	HRC <sub>3</sub>	HRC <sub>4</sub>	HRC <sub>5r</sub>
1,5	37	44	28,5	41	40,67
3	41,5	46	28	34	40,50
5	31,5	38	24	25	31,50
7	26,5	29,5	23	23	26,33
9	23,5	26	21	19,5	23,00
11	21	24	20	15	20,00
13	19,5	21	20	14	18,17
15	18,5	19	17,5	12,5	16,67
20	14	14	12,5	10,5	12,83
25	12	12,5	10	8,5	11,00
30	11	10,5	8,5	6	9,17
35	9	9,5	7,5	6	8,17
40	9	8,5	7	5,5	7,67
45	7,5	7	5,5	5,5	6,67
50	7	6,5	6,5	5,5	6,33

Jak widać, wyniki pomiarów twardości poszczególnych próbek wykazują różnice, zwłaszcza w pobliżu czoła próbki, co świadczy o występowaniu niejednorodności składu chemicznego staliwa. Wyniki średnich twardości  $HRC_{\text{sr}}$  posłużyły do sporządzenia krzywych hartowności badanych gatunków staliwa (rys. 1 i 2). Jak widać, przy obu temperaturach austenitzowania krzywa hartowności wytopu L20G leży poniżej krzywej wytopu L20HM.



Rys. 1. Krzywe hartowności Jominy'ego staliwa L20G i L20HM po austenitzowaniu w temperaturze 920°C



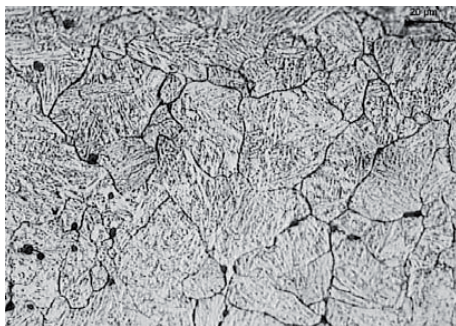
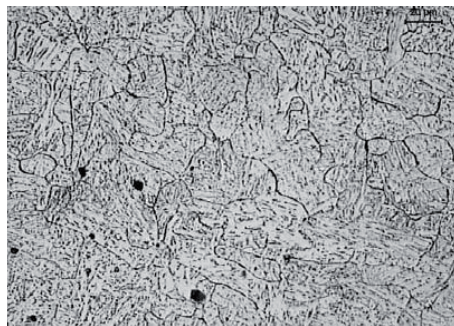
Rys. 2. Krzywe hartowności Jominy'ego staliwa L20G i L20HM po austenitzowaniu w temperaturze 1020°C

### Przykłady mikrostruktur z ujawnionymi wielkościami ziarna byłego austenitu

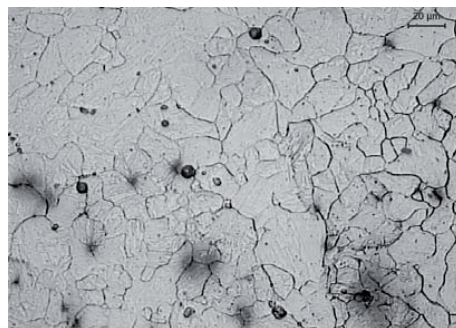
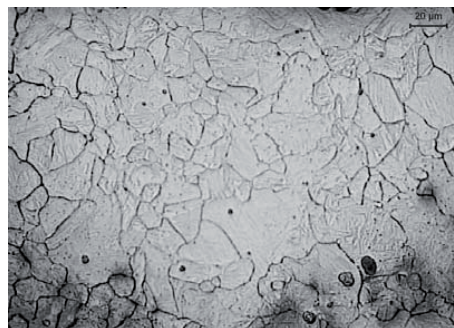
Przykłady mikrostruktur z ujawnionymi granicami ziarn byłego austenitu przy temperaturze austenitzowania 920 i 1020°C są zaprezentowane: dla staliwa L20HM na rys. 3 i 4, dla staliwa L20G – na rys. 5 i 6. Przy tej samej temperaturze austenitzowania staliwo L20G wykazywało większe ziarno austenitu. Wyniki pomiarów wielkości ziarna byłego austenitu zamieszczono w tabeli 3.



**Rys. 3.** Przykłady mikrostruktury staliwa L20HM austenitzowanego w temperaturze 920°C, z ujawnionymi granicami ziarn byłego austenitu

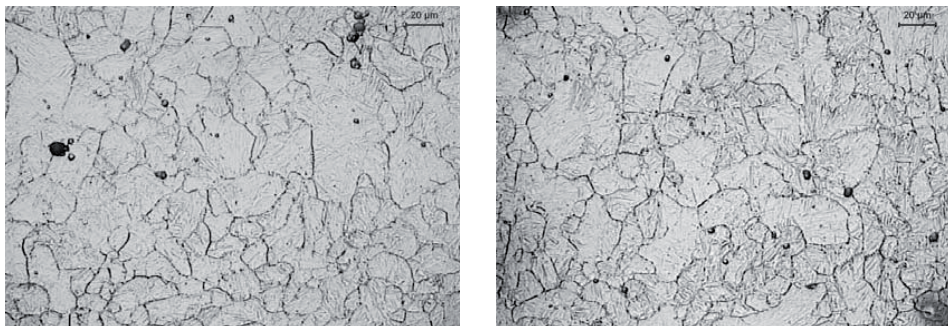


**Rys. 4.** Przykłady mikrostruktury staliwa L20HM austenitzowanego w temperaturze 1020°C, z ujawnionymi granicami ziarn byłego austenitu



**Rys. 5.** Przykłady mikrostruktury staliwa L20G austenitzowanego w temperaturze 920°C, z ujawnionymi granicami ziarn byłego austenitu





**Rys. 6.** Przykłady mikrostruktury staliwa L20G austenitowanego w temperaturze 1020°C, z ujawnionymi granicami ziarn byłego austenitu

### Wyznaczanie parametrów hartowności

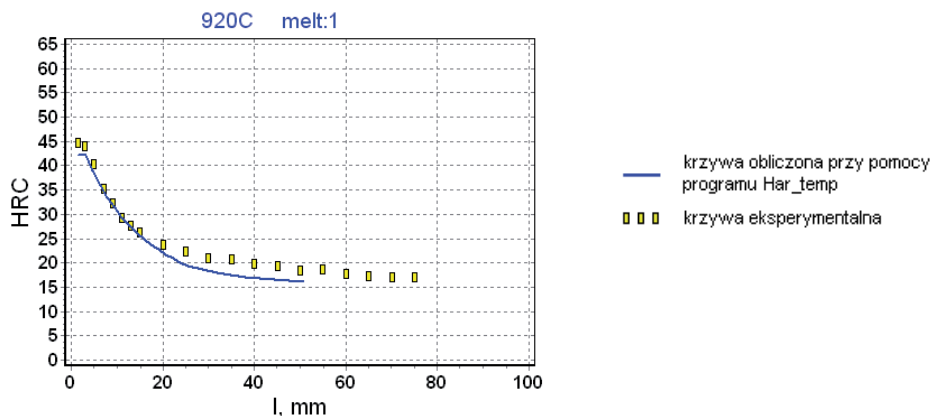
Do wyznaczenia wartości parametrów charakteryzujących hartowność badanych staliw wykorzystano doświadczalne krzywe hartowności zamieszczone na rysunkach 1 i 2. Korzystając z programu Har\_Temp, na podstawie zawartości węgla w staliwie, określono twardość strefy półmartenzytycznej  $HRC_{50}$ , następnie znaleziono odpowiadające tej twardości odległości strefy półmartenzytycznej  $l_k$  oraz obliczono wartości idealnej średnicy krytycznej  $D_{ij}$ . Dla porównania obliczono – na podstawie znajomości składu chemicznego i wielkości ziarna austenitu – wartości idealnej średnicy  $D_i$ . Wykorzystując wartości  $D_i$ , obliczono również krzywe hartowności. Zestawienie wartości  $D_{ij}$  oraz  $D_i$  wraz z parametrami pośrednimi ( $HRC_{50}$  i  $l_k$ ) oraz średniej długości cięciwy  $l$  i numeru wielkości ziarna austenitu według skali ASTM, numer ziarna zamieszczono w tablicy 3. Jak widać z zamieszczonych wyników, przy temperaturze 920°C uzyskano bardzo dobrą zgodność wartości idealnych średnic krytycznych określonych metodą doświadczalną i obliczeniową a różnice pomiędzy wartościami  $D_{ij}$  i  $D_i$  nie przekraczały 1 mm. Przy temperaturze 1020°C różnice te były większe i wynosiły ponad 8 mm dla staliwa L20HM i niecałe 6 mm dla staliwa L20G.

**Tab. 6.** Parametry hartowności staliwa i wielkości ziarna austenitu L20HM i L20G

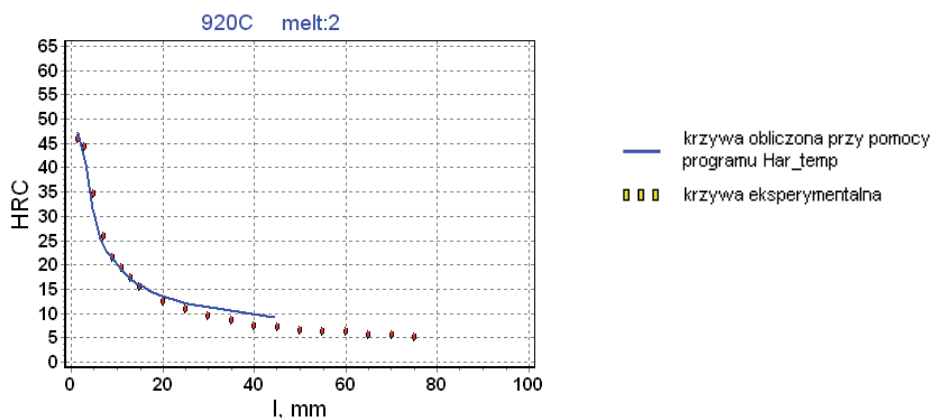
Gatunek	$T_h$ (°C)	$HRC_{50}$	$l_k$ (mm)	$D_{ij}$ (mm)	$D_i$ (mm)	$l$ (μm)	Nr ziarna
L20HM	920	30,37	10,25	65,08	64,97	16,53	8,5
	1020	30,37	12,33	74,07	65,33	16,91	8,4
L20G	920	34,94	4,93	33,05	32,13	10,13	9,9
	1020	34,94	4,23	28,36	34,34	12,96	9,2

Na rys. 7 porównano krzywe hartowności badanych staliw dla temperatury hartowania 920°C, obliczone przy pomocy programu komputerowego Har\_Temp na podstawie składu chemicznego i wielkości ziarna austenitu z krzywymi eksperymentalnymi. W obu wyciach stwierdzono bardzo dobrą zgodność krzywych, szczególnie w zakresie odległości od czoła nie przekraczających 20 mm, w którym mieści się odległość strefy półmartenzytycznej.

a)



b)



Rys. 7. Krzywe hartowności eksperymentalne oraz obliczone według programu Har\_Temp. a) staliwo L20HM, b) staliwo L20G

## Omówienie wyników

Przeprowadzono badania porównawcze hartowności dwu gatunków niskostopowych stali konstrukcyjnych, L20HM i L20G przy zastosowaniu eksperymentalnej metody hartowania od czoła i metody obliczeniowej Grossmanna. Badane staliwa znacznie różniły się hartownością ze względu na różnice w składzie chemicznym. Wyższą hartowność wykazywało staliwo L20HM zawierające 0,6% Mn, 0,62% Cr i 0,39% Mo, w porównaniu ze staliwem L20G, zawierającym 1,16% Mn. Dodatkową przyczyną niższej hartowności staliwa L20G było drobniejsze ziarno austenitu tego staliwa, które zawierało 0,03% Ti i 0,05% Al. Oba te pierwiastki sprzyjają drobnoziarnistości stali ze względu na powstające wydzielenia węglikoazotku

Ti(C,N) i azotku AlN, hamujące migrację granic ziarn austenitu w podwyższonych temperaturach. Jak wiadomo, zmniejszenie wielkości ziarna austenitu powoduje spadek hartowności, gdyż granice ziarn ułatwiają zarodkowanie produktów przemian dyfuzyjnych rozpadu przechłodzonego austenitu.

Przy temperaturze 920°C uzyskano bardzo dobrą zgodność obliczonych metodą analityczną Grossmanna i określonych na podstawie eksperymentalnej próby hartowania od czoła idealnych średnic krytycznych  $D_i$  i  $D_{ij}$ , które wynosiły ok. 65 mm i ok. 32–33 mm dla staliw odpowiednio L20HM i L20G. Świadczy to o tym, że metody stosowane do oceny hartowności stali są w pełni przydatne do oceny hartowności staliw. Tego należy się spodziewać, jeśli staliwo ma podobny do stali skład chemiczny, a w jego strukturze nie występują segregacje pierwiastków stopowych i odlew nie wykazuje porowatości. Oba te czynniki zmniejszają hartowność stopu. W badanych staliwach nie stwierdzono występowania porów, natomiast występowały segregacje składu chemicznego, powodujące występowanie różnic krzywych hartowności mierzonych w różnych miejscach tej samej próbki. Pomimo tych różnic obliczone wartości  $D_i$  i  $D_{ij}$  dla obu staliw były zbliżone. Na podkreślenie zasługuje również zadowalająca zgodność obliczonych i eksperymentalnych krzywych hartowności obu stali. Przy wyższej temperaturze austenitzowania – 1020°C – różnice pomiędzy wartościami  $D_i$  i  $D_{ij}$  były większe.

## Wnioski

1. Badane staliwa L30HM i L20G różniły się wielkością ziarna austenitu, przy stosowanych temperaturach austenitzowania 920 i 1020°C. Mniejsze ziarno austenitu występowało w staliwie L20G, zawierającym 0,05% Al i 0,03% Ti.
2. Wyższą hartowność wykazywało staliwo L20HM w porównaniu do L20G ze względu na większą zawartość pierwiastków stopowych.
3. W staliwach prawdopodobnie występowały segregacje węgla i pierwiastków stopowych, powodujące występowanie różnic pomiędzy krzywymi hartowności mierzonych w różnych miejscach tych samych próbek Jominy'ego.
4. W obu staliwach stwierdzono bardzo dobrą zgodność określonych eksperymentalnie i obliczonych metodą analityczną Grossmanna (z wykorzystaniem danych [2]) wartości idealnych średnic krytycznych, przy temperaturze hartowania równej 920°C.
5. Stwierdzono zadowalającą zgodność eksperymentalnych i obliczonych (według danych [12]) krzywych hartowności obu staliw, przy temperaturze hartowania równej 920°C.

## Bibliografia

- [1] Polska norma PN-EN ISO 642, Stal. Badanie hartowności metodą oziębiania (próba Jominy'ego)
- [2] Grossmann M.A., Trans. AIME, 1942, 150, 227–255
- [3] Doane D.V., *Hardenability Concepts with Application to Steels*, ed. D.V. Doane., AIME, 1979, s. 351–379
- [4] SigmaScan Pro Automated Image Analysis Software, User's Manual, Jandel Scientific Software, 1995

- [5] H. Adrian, R. Staško, HUTNIK-Wiadomości Hutnicze 2006, nr 3, s. 113–120
- [6] Kramer I.R., Siegel S., Brooks G., Trans. AIME, 1946, vol. 167, pp. 670–697
- [7] DeRetana A.F., Doane D.V., Metal Progress, 1971, Sept., s. 65–69
- [8] Moser A.I., Legat A., Härterei-Techn. Mitt., 1969, vol. 24, pp. 100–105
- [9] Hodge J.M., Orehoski M.A., Trans. AIME, 1946, vol. 167, pp. 627–642
- [10] Grossmann M.A., *Elements of Hardenability*, American Society for Metals, Cleveland 1952
- [11] Boyd L.C., Field J., AISI Contribution to the Metallurgy of Steel, 1945, no. 12
- [12] Sponzilli J.T., Keith C.J., Walter C.H., ASM Metal Progress, 1975, vol. 108, s. 86–87
- [13] Eldis G.T., Calculation of the Jominy Curve for Carburising Steels, Climax Molibdenum Co. of Michigan, Report L-193–94, cyt. w "Hardenability Concepts with Application to Steels", ed. D.V. Doane., AIME, 1979, s. 372
- [14] Standard Method for End-Quench Test for Hardenability of Steel, Designation: A255-88
- [15] Crafts W. i Lamont J.L., *Hartowność i dobór stali*, Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa 1958

## Investigation of the hardenability of cast steel

### Abstract

The aim of the investigation was to verify if published data for calculation of the hardenability of steel can be used for calculation of hardenability of cast steel and the optimal selection of these data for obtaining the best agreement between calculated and experimental data. The analysis of the hardenability of low alloy cast steel was carried out using Jominy test and analytical Grossmann method. The optimal data for calculation of ideal critical diameter,  $D_i$  and Jominy curve were selected. The hardenability curves of cast steel measured on different planes of Jominy test show scatter on the contrary to forged steel. Results of investigations prove that data for calculation of hardenability parameters used for steel can be applied with sufficient accuracy for calculation the hardenability of cast steel. The hardenability of cast steel shows scatter of results. The analysis of the hardenability of cast steel can be carried out using the same data as for forged steel.

Keywords: hardenability, Jominy test, Grossmann method, calculation of Jominy curve