

## WPŁYW OBRÓBKİ CIEPLNEJ NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE STALIWA GS-20Mn5 PRZEZNACZONEGO DO PRACY W OBNIŻONEJ TEMPERATURZE

## EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF GS-20Mn5 CAST STEEL ASSIGNED FOR OPERATION AT LOW TEMPERATURES

*Andrzej Gwiżdż, Krzysztof Jaśkowiec, Zenon Pirowski, Jacek Wodnicki*

*Instytut Odlewnictwa, ul. Zakopiańska 73, 30-418 Kraków*

### **Streszczenie**

*Przedstawiona praca stanowi część badań przemysłowych (stosowanych) wykonanych w ramach projektu celowego ROW-II-403/2008 realizowanego w MAGNUS-NORD w Toruniu. Celem pracy było dobranie obróbki cieplnej zapewniającej uzyskanie założonych wartości udarności staliwa GS-20Mn5 w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$  oraz  $-55^{\circ}\text{C}$ . W artykule nakreślono problem związany z przejściem stopów w stan kruchy przy obniżeniu temperatury eksploatacji. Ze względu na charakter produkcji odlewów w zakładach „Magnus-Nord” w Toruniu praca dotyczyła możliwości uzyskania, w warunkach tej odlewni, staliwa konstrukcyjnego niskostopowego z przeznaczeniem na wybrane odlewy pracujące w temperaturze poniżej  $-20^{\circ}\text{C}$ . Przeprowadzono wytopy staliwa GS-20Mn5, a następnie dobrano parametry obróbki cieplnej tego stopu umożliwiające osiągnięcie odpowiedniej udarności w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$  (20-50 J) i temperaturze  $-55^{\circ}\text{C}$  (20-30 J).*

*Słowa kluczowe: stopy żelaza, obróbka cieplna, udarność, temperatura kruchości, staliwo do pracy w obniżonej temperaturze*

### **Abstract**

*The study formed a part of industrial (applied) research executed under Target Project ROW-II-403/2008 at MAGNUS-NORD in Toruń. The aim of the study was to select the heat treatment parameters ensuring the required impact resistance values of GS-20Mn5 cast steel when operating at  $-30^{\circ}\text{C}$  and  $-55^{\circ}\text{C}$ . The study outlines the problem of alloy embrittlement when operating at low temperatures. Considering the production profile of „Magnus-Nord” Toruń, the study mainly regarded the possibilities of manufacturing under the conditions of this specific Foundry, the structural low-alloyed steel for castings operating at temperatures below  $-20^{\circ}\text{C}$ . Consequently, the GS-20Mn5 steel was melted and, as a next step, parameters of the heat treatment of this alloy were selected to satisfy the requirements to obtain the required impact resistance at temperatures of  $-30^{\circ}\text{C}$  (20-50J) and  $-55^{\circ}\text{C}$  (20-30).*

*Keywords: ferrous alloys, heat treatment, impact resistance, embrittlement temperature, cast steel for operation at low temperatures*

## Wstęp

Obniżona temperatura eksploatacji konstrukcji sprzyja kruchości stali, powodując zmianę w sposobie pękania od plastycznego do kruchego. Zmiana w sposobie pękania występuje w pewnym przedziale temperatury. Przyjmując określony poziom udarności można wyznaczyć dla różnych rodzajów stali temperaturę przejścia w stan kruchy.

Podstawowym problemem przy budowie wszelkiego rodzaju konstrukcji i urządzeń pracujących w obniżonej temperaturze jest dobór właściwego materiału. Stal zwykła, jako podstawowy materiał konstrukcyjny, wraz z obniżeniem temperatury traci plastyczność, ma zatem ograniczone zastosowanie. W niskiej temperaturze dobrze zachowują się stopy aluminium, stopy miedzi oraz niektóre typy stali stopowych. Zwykle stale niskowęglowe, ze względu na przejście w stan kruchy w stosunkowo wysokiej temperaturze mają ograniczone zastosowanie. Udarność stali zależy jednak od wielu czynników i temperatura przejścia tych stali w stan kruchy może być nieco przesunięta w kierunku temperatury dodatniej lub ujemnej, np. węgiel przesuwa gwałtownie temperaturę przejścia w stan kruchy w stronę temperatur dodatnich (każde 0,01% C przesuwa tę temperaturę o 1,2°C), mangan w ilości do 2% dodatnio wpływa na udarność stali w niskiej temperaturze, nikiel ma podobny wpływ jak mangan i jest dodawany do stali niskowęglowych łącznie z manganem, krzem w ilości do 0,3% wpływa dodatnio na udarność, natomiast domieszki fosforu i siarki wpływają zdecydowanie ujemnie. Stale niskowęglowe drobnoziarniste mogą być przy odpowiednio starannej produkcji (mała ilość zanieczyszczeń) przydatne do pracy nawet w temperaturze do -60°C. Stal niskowęglowa ulepszona cieplnie może być dopuszczona do pracy w temperaturze do -80°C. Podobnie stale niskostopowe mogą pracować do tego samego zakresu obniżonej temperatury. Do pracy w niższej temperaturze należy stosować stale wysokostopowe lub inne stopy [1, 2, 3, 9].

Przedmiotem badań było staliwo GS-20Mn5 (1.1120), według normy DIN 17 182:1991.

## 1. Materiał badawczy

W ramach projektu celowego [4] realizowanego w Odlewni Żeliwa i Staliwa „Magnus-Nord” w Toruniu wykonano dwa wytopy staliwa GS-20Mn5 różniące się zastosowanymi zabiegami metalurgicznymi.

Wytop I - wsad bez specjalnego oczyszczania materiałów wsadowych takich, jak surówka i złom stalowy, odtlenianie po analizie ruchowej i wprowadzeniu dodatków korygujących skład chemiczny (C, Mn, Si) w piecu dodatkiem Ca-Si i Al, spust metalu.

Wytop II - wsad: surówka i złom stalowy osrutowany, żelazostopy dogrzewane przed dodaniem do ciekłego metalu, odtlenianie po analizie ruchowej (bez korekty składu) w kadzi dodatkiem Ca-Si i Al.

Skład chemiczny wytopów:

I - C-0,21%, Si-0,32%, Mn-1,10%, P-0,02%, S-0,015%, Cr-0,23%, Ni-0,05%, Cu-0,08%;

II - C-0,17%, Si-0,34%, Mn-1,20%, P-0,02%, S-0,025%, Cr-0,12%, Ni-0,04%, Cu-0,08%.

Z wytopów tych pobrano próbki do badań właściwości mechanicznych: wytrzymałości  $R_m$ , twardości HB oraz udarności KV w temperaturze: 20°C, -30°C, -55°C.

Próbki do badań właściwości mechanicznych pobierane były z wlewków próbných (klinów) formowanych w masie przymodelowej na szkle wodnym z pokryciem cyrkonowym na akoholu.

Wykonane próbki zostały poddane procesom obróbki cieplnej, po których przeprowadzono badania właściwości wytrzymałościowych.

## 2. Obróbka cieplna

### 2.1. Normalizowanie

Zabiegi nagrzewania i wygrzewania podczas operacji normalizowania przeprowadzono w piecu „Multitherm N 41/M” o mocy 13 kW, ze szczelną retortą o wymiarach przestrzeni roboczej 320 × 450 × 150 mm. Parametry procesu były następujące:

- nagrzewanie z piecem do temperatury 950°C;
- wygrzewanie w tej temperaturze przez 1,5 h;
- chłodzenie w spokojnym powietrzu.

Zabiegi nagrzewania i wygrzewania przeprowadzono w atmosferze ochronnej argonu. Normalizowaniu poddano wszystkie próbki do badań wytrzymałościowych z obu wytopów.

### 2.2. Hartowanie

Zabiegi nagrzewania i wygrzewania podczas operacji austenitowania w procesie hartowania, przeprowadzono również w piecu „Multitherm N 41/M”, w atmosferze ochronnej argonu.

Parametry procesu hartowania były następujące:

- nagrzewanie z piecem do temperatury 930°C;
- wygrzewanie w tej temperaturze przez 1,5 h;
- oziębienie w wodzie.

Dla każdego z wytopów hartowaniu poddano tylko część (2/3) próbek wcześniej normalizowanych.

### 2.3. Odpuszczanie

Proces odpuszczania przeprowadzono w piecu KO 1150 o mocy 8 kW i wymiarach przestrzeni roboczej 300 × 300 × 600 mm, w atmosferze naturalnej bez wymuszonego obiegu. Odpuszczaniu poddano wszystkie zahartowane uprzednio próbki z obu wytopów. Proces odpuszczania prowadzono w dwóch wariantach różniących się temperaturą odpuszczania. Temperaturę tę dobrano na poziomie górnej i dolnej wartości przewidywanej przez normę [7] dla staliwa GS-20Mn5. Parametry procesu odpuszczania dla tych wariantów były następujące:

1. Dla połowy hartowanych próbek z wytopu I i z wytopu II:
  - nagrzewanie z piecem do temperatury 610°C;
  - wygrzewanie w tej temperaturze przez 1,5 h;
  - chłodzenie w spokojnym powietrzu.
2. Dla pozostałych hartowanych próbek z wytopu I i z wytopu II:
  - nagrzewanie z piecem do temperatury 660°C;
  - wygrzewanie w tej temperaturze przez 1,5 h;
  - chłodzenie w spokojnym powietrzu.

### 3. Przeprowadzone badania

Do identyfikacji próbek z poszczególnych wytopów i stanu ich obróbki cieplej zastosowano następujące oznaczenia:

- próbki tylko normalizowane (N):
  - I/N1 – wytop I; temperatura badania +20°C,
  - I/N2 – wytop I; temperatura badania -30°C,
  - I/N3 – wytop I; temperatura badania -55°C,
  - II/N1 – wytop II; temperatura badania +20°C,
  - II/N2 – wytop II; temperatura badania -30°C,
  - II/N3 – wytop II; temperatura badania -55°C,
- próbki hartowane i odpuszczane w temperaturze niższej (Q1):
  - I/Q1.1 – wytop I; temperatura badania +20°C,
  - I/Q1.2 – wytop I; temperatura badania -30°C,
  - I/Q1.3 – wytop I; temperatura badania -55°C,
  - II/Q1.1 – wytop II; temperatura badania +20°C,
  - II/Q1.2 – wytop II; temperatura badania -30°C,
  - II/Q1.3 – wytop II; temperatura badania -55°C,
- próbki hartowane i odpuszczane w temperaturze wyższej (Q2):
  - I/Q2.1 – wytop I; temperatura badania +20°C,
  - I/Q2.2 – wytop I; temperatura badania -30°C,
  - I/Q2.3 – wytop I; temperatura badania -55°C,
  - II/Q2.1 – wytop II; temperatura badania +20°C,
  - II/Q2.2 – wytop II; temperatura badania -30°C,
  - II/Q2.3 – wytop II; temperatura badania -55°C.

Obrobione cieplnie próbki zostały poddane próbie udarności (KV) w temperaturze: +20°C, -30°C i -55°C.

Przeprowadzono też statyczną próbę rozciągania w temperaturze +20°C, w której określano wytrzymałość na rozciąganie ( $R_m$ ), granicę plastyczności ( $R_e$ ) i wydłużenie ( $A_5$ ) oraz dokonano pomiarów twardości (HB).

Tabela 1. Wyniki pomiarów  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A_5$  i HB w temperaturze +20°C

Table 1. The results of measurements of  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $A_5$  and HB at a temperature of +20°C

Wytop	Obróbka cieplna*	Oznaczn. próbek	Mierzony parametr			
			$R_m$ MPa	$R_e$ MPa	$A_5$ %	HB
I	Normalizowanie (950°C/1,5 h)	I/N	610	375	27,3	163
	Ulepszanie cieplne (H-930/w, O-610/p)	I/Q1	665	585	16,8	189
	Ulepszanie cieplne (H-930/w, O-660/p)	I/Q2	600	507	19,9	168

Tabela 1 c.d.  
Table 1 cntd.

Wytop	Obróbka cieplna*	Oznaczn. próbek	Mierzony parametr			
			R <sub>m</sub> MPa	R <sub>e</sub> MPa	A <sub>5</sub> %	HB
II	Normalizowanie (950°C/1,5 h)	II/N	571	364	30,3	161
	Ulepszanie cieplne (H-930/w, O-610/p)	II/Q1	654	611	17,0	175
	Ulepszanie cieplne (H-930/w, O-660/p)	II/Q2	582	502	24,1	170

\*H - hartowanie, O - odpuszczanie, w - woda, p - powietrze

Tabela 2. Wyniki pomiarów udarności w temperaturze: +20°C, -30°C, -55°C

Table 2. The results of measurements of impact resistance at temperatures of +20°C, -30°C, -55°C

Wytop	Obróbka cieplna	Temperatura pomiaru °C	Oznaczenie próbek	KV J
I	Normalizowanie (950°C/1,5 h)	+20	I/N.1	60,2
		-30	I/N.2	34,6
		-55	I/N.3	15,2
	Ulepszanie cieplne (H-930/w, O-610/p)	+20	I/Q1.1	68,9
		-30	I/Q1.2	66,4
		-55	I/Q1.3	58,8
	Ulepszanie cieplne (H-930/w, O-660/p)	+20	I/Q2.1	92,8
		-30	I/Q2.2	85,7
		-55	I/Q2.3	78,8
II	Normalizowanie (950°C/1,5 h)	+20	II/N.1	61,9
		-30	II/N.2	32,7
		-55	II/N.3	12,3
	Ulepszanie cieplne (H-930/w, O-610/p)	+20	II/Q1.1	60,1
		-30	II/Q1.2	38,2
		-55	II/Q1.3	28,4
	Ulepszanie cieplne (H-930/w, O-660/p)	+20	II/Q2.1	74,9
		-30	II/Q2.2	70,6
		-55	II/Q2.3	67,7

#### 4. Analiza wyników i wnioski

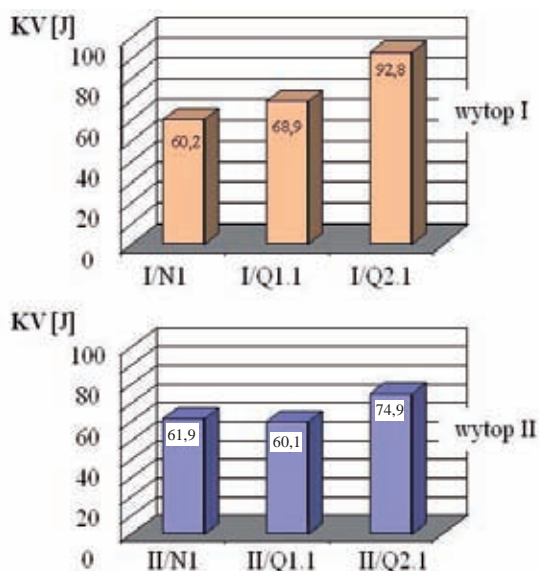
Założone parametry udarności objęte realizowanym projektem winny wynosić [4]:

- udarność stopu w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$ : 20–50 J,
- udarność stopu w temperaturze  $-55^{\circ}\text{C}$ : 20–30 J.

Jak wynika z uzyskanych właściwości, zdecydowany wpływ na udarność staliwa GS-20Mn5, zwłaszcza w obniżonej temperaturze, ma rodzaj i parametry zastosowanej obróbki cieplnej. W przypadku odlewów pracujących w temperaturze do  $-30^{\circ}\text{C}$  wystarczającym zabiegiem cieplnym może być normalizowanie. Uzyskuje się wówczas w tej temperaturze udarność powyżej 30 J, bez względu na sposób prowadzenia wytopu (wytop I i wytop II).

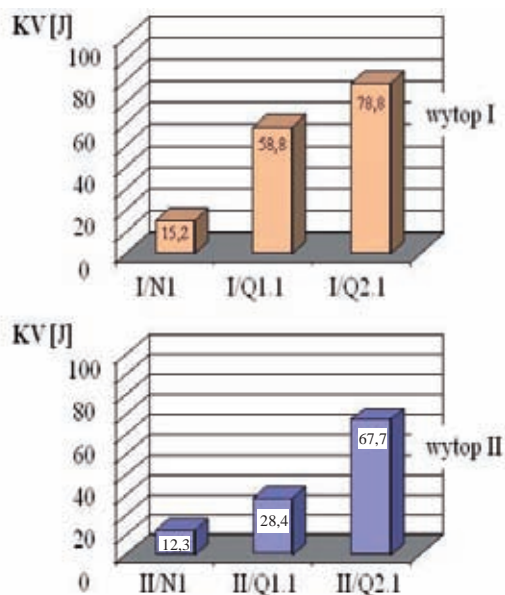
Jeżeli odlewy przeznaczone są do pracy w temperaturze do  $-55^{\circ}\text{C}$ , to oprócz normalizowania zachodzi konieczność stosowania zabiegów ulepszenia cieplnego. W przypadku, gdy wymagana jest wyższa udarność, odpuszczanie należy prowadzić w wyższej temperaturze ( $660^{\circ}\text{C}$ ). Jeżeli natomiast wymagana będzie wyższa wytrzymałość, to odpuszczanie musi być prowadzone w temperaturze niższej ( $610^{\circ}\text{C}$ ), jednak należy się wówczas liczyć ze znacznym spadkiem udarności, ale w dalszym ciągu parametr ten będzie spełniał założenia (udarność stopu w tej temperaturze: 20–30 J).

Wpływ zastosowanych operacji i zabiegów cieplnych na udarność w temperaturze:  $+20^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C}$  i  $-55^{\circ}\text{C}$ , graficznie zilustrowano na zamieszczonych wykresach (rys. 1, 2, 3).



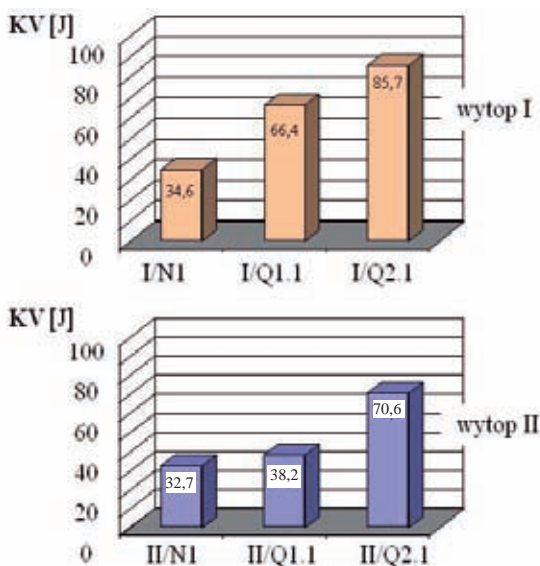
Rys. 1. Wpływ przeprowadzonych operacji i zabiegów cieplnych na udarność KV staliwa GS-20Mn5 w temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$

Fig. 1. Heat treatment vs impact resistance KV of GS-20Mn5 cast steel at a temperature of  $+20^{\circ}\text{C}$



Rys. 2. Wpływ przeprowadzonych operacji i zabiegów cieplnych na udarność KV staliwa GS-20Mn5 w temperaturze -30°C

Fig. 2. Heat treatment vs impact resistance KV of GS-20Mn5 cast steel at a temperature of -30°C

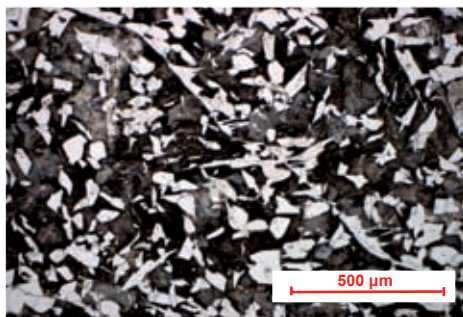


Rys. 3. Wpływ przeprowadzonych operacji i zabiegów cieplnych na udarność KV staliwa GS-20Mn5 w temperaturze -55°C

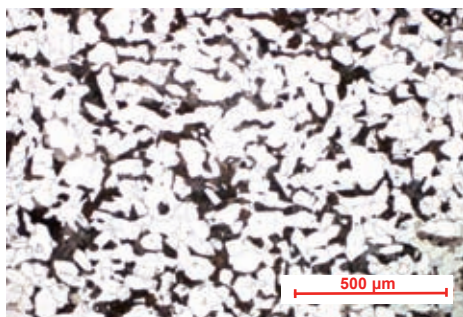
Fig. 3. Heat treatment vs impact resistance KV of GS-20Mn5 cast steel at a temperature of -55°C

Jak wynika z powyższych wykresów, staliwo GS-20Mn5 z obu wykonanych wytopów odpowiednio obrobione cieplnie spełnia założenia A - KV - min. 20 J w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$ ,  $-55^{\circ}\text{C}$ . Należy wspomnieć, że metal przygotowany do zalwania form w wytopie II posiadał mniejszą zawartość gazów i wtrąceń niemetalicznych. Mimo tego wykazuje on mniejszą wytrzymałość  $R_m$  i udarność KV, przy większym wydłużeniu  $A_5$ . Przyczynę tego można upatrywać w niewielkiej, lecz istotnej z metaloznawczego punktu widzenia, różnicy składu chemicznego obu stopów.

Analiza chemiczna stopów I i II wykonana w Zespole Akredytowanych Laboratoriów Badawczych Instytutu Odlewnictwa wykazała dość znaczną różnicę w zawartości chromu. W przypadku stopu II zawartości tego dodatku wyniosła 0,20%, a w stopie I - aż 0,40%. Przekracza to dopuszczalną normą [9] jego zawartość o ponad 30%. Ta różnica w zawartości chromu spowodowała zmianę struktury staliwo GS-20Mn5 w stanie odlanym z perlityczno-ferrytycznej (stop I) na ferrytyczno-perlityczną (stop II). Przedstawiono to na rysunkach 4 i 5 [6]. Struktura wyjściowa stopu do obróbki cieplnej ma wpływ na uzyskiwane właściwości po tej obróbce [9].



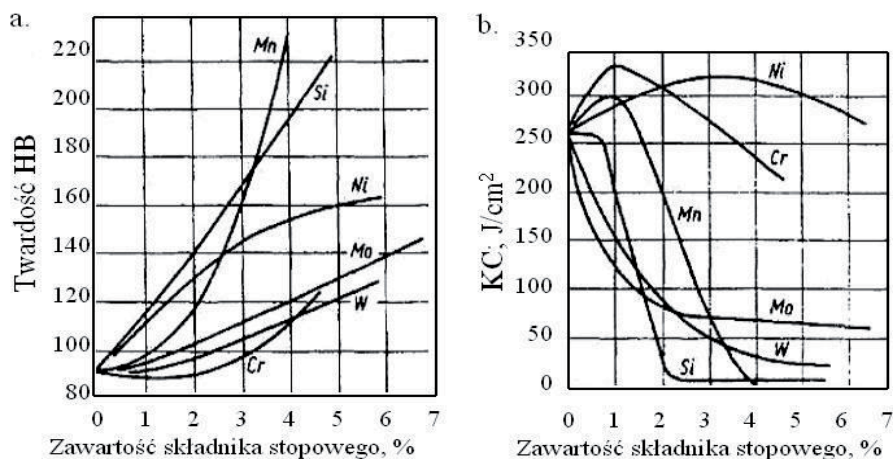
Rys. 4. Mikrostruktura próbki stop I, trawiona Mi1Fe, pow. 100x  
Fig. 4. Microstructure of specimen, alloy I, etched with Mi1Fe, 100x



Rys. 5. Mikrostruktura próbki stop II, trawiona Mi1Fe, pow. 100x  
Fig. 5. Microstructure of specimen, alloy II, etched with Mi1Fe, 100x



Chrom w zakresie zawartości do 1% obniża nieznacznie twardość ferrytu, a znacząco zwiększa jego udurowność, co pokazują wykresy zamieszczone na rysunku 6 [6, 8].

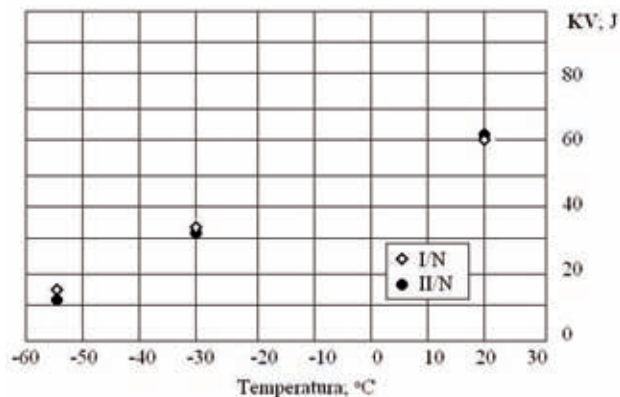


Rys. 6. Wpływ pierwiastków stopowych na właściwości ferrytu: a) na twardość, b) na udurowność [6]

Fig. 6. The effect of alloying elements on the properties of ferrite: a) on hardness, b) on impact resistance [6]

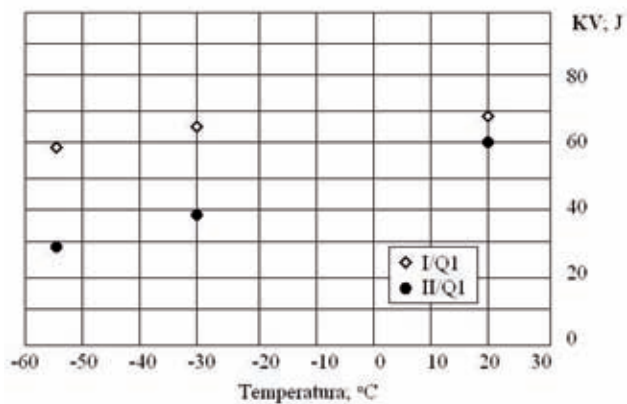
Chrom ponadto zwiększa ilość plastycznego austenitu szczątkowego w procesie hartowania, rozpuszcza się w cementycie, zmniejsza zawartość węgla w perlicie, a ferryt umacnia dopiero przy wyższych zawartościach (powyżej 2%). Czynniki te sprzyjają uzyskiwaniu większej udurowności stopu [9, 10].

Stwierdzono ponadto, że zawartość węgla, zwłaszcza w stopie II jest na dolnej granicy (0,17%) wymogów wspomnianej normy [5]. Ta zawartość może nie wystarczyć do prawidłowego przeprowadzenia zabiegu hartowania. Potwierdzeniem tego mogą być zamieszczone wykresy (rys. 7, 8, 9) uzyskanej zależności udurowności od temperatury pracy, gdzie największe różnice pomiędzy stopem I i II występują w próbkach hartowanych i nisko odpuszczanych (rys. 8) i gdzie najbardziej uwidocznione są efekty procesu hartowania. Przy wyższym odpuszczaniu efekty te są bardziej osłabiane (rys. 9), co skutkuje mniejszymi rozbieżnościami właściwości, między stopem I i II. W przypadku próbek poddanych tylko normalizowaniu, różnice pomiędzy tymi stopami praktycznie nie występują (rys. 7).



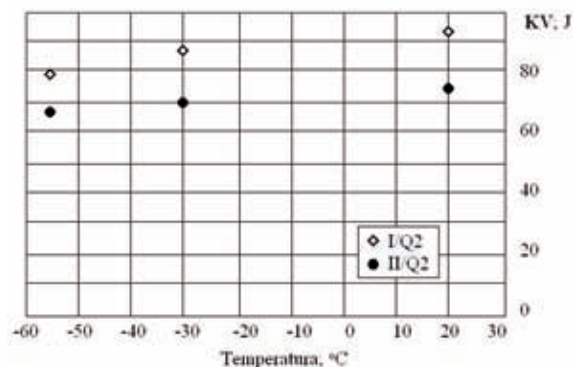
Rys. 7. Wpływ temperatury badania na udarność staliwa GS-20Mn5 poddanego normalizowaniu

Fig. 7. Temperature vs impact resistance of GS-20Mn5 cast steel subjected to normalising treatment



Rys. 8. Wpływ temperatury badania na udarność staliwa GS-20Mn5 poddanego normalizowaniu, hartowaniu i niskiemu odpuszczaniu

Fig. 8. Temperature vs impact resistance of GS-20Mn5 cast steel subjected to normalising, quenching and low-temperature tempering



Rys. 9. Wpływ temperatury badania na udarność staliwa GS-20Mn5 poddanego normalizowaniu, hartowaniu i wysokiemu odpuszczaniu

Fig. 9. Temperature vs impact resistance of GS-20Mn5 cast steel subjected to normalising, quenching and high-temperature tempering

Podsumowując można stwierdzić, że wykonane stopy spełniają zakładane wymogi czyli uzyskanie udarności KV w temperaturze  $-30^{\circ}\text{C}$  do 50 J oraz  $-55^{\circ}\text{C}$  do 30 J.

Prowadząc wytypy należy zwrócić uwagę na zawartość chromu w metalu, który w zakresie 0,3–0,5%, choć przekracza dopuszczalną normą zawartość, może zwiększyć wytrzymałość i udarność staliwa GS-20Mn5, zwłaszcza przy zaniżonej zawartości węgla. Większa zawartość chromu może jednak okazać się niepożądana powodując nadmierny wzrost twardości stopu i spadek jego udarności.

## Podziękowania

Pracę wykonano w ramach realizacji projektu celowego ROW-II-294 „Opracowanie technologii wytwarzania i uruchomienie produkcji odlewów stalowych o zwiększonych właściwościach mechanicznych w niskiej temperaturze” współfinansowanego przez CI NOT. Autorzy dziękują Panu Krzysztofowi Żurawskiemu, Prezesowi firmy MAGNUS-NORD za współpracę przy realizacji badań.

## Literatura

1. Cejnog K., Młynarczyk L.: Stalwo konstrukcyjne węglowe wg PN-ISO 3755:1991, Przegląd Odlewnictwa, 1998, t. 48, nr 10, s. 345–346
2. Wachelko T., Nowak A., Sowiński M. S.: Optymalizacja składu chemicznego i obróbki cieplnej staliwa manganowego przeznaczonego do pracy w obniżonych temperaturach, Przegląd Odlewnictwa, 1985, t. 35, nr 2, s. 42–46
3. Informacja internetowa: [http://www.sciaga.pl/tekst/51695-52-wytrzymalosc\\_laczy\\_sprawny-m\\_w\\_niskich\\_temperaturach](http://www.sciaga.pl/tekst/51695-52-wytrzymalosc_laczy_sprawny-m_w_niskich_temperaturach)
4. Projekt celowy ROW-II-294 pt.: Opracowanie technologii wytwarzania i uruchomienie produkcji odlewów stalowych o zwiększonych właściwościach mechanicznych w niskiej temperaturze

5. Norma DIN 17 182:1991 Odlewy staliwne o podwyższonej spawalności i ciągliwości ogólnego przeznaczenia. Warunki techniczne odbioru.
6. Hucińska J. i inni.: Metaloznawstwo, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1995
7. Malkiewicz T.: Metaloznawstwo stopów żelaza, PWN, Warszawa-Kraków, 1976
8. Informacja internetowa: <http://www.stalnierdzewna.com/index.php/informacje-o-stali-nierdzewnej/obrobka-stali-nierdzewnej/obrobka-cieplno-chemiczna/dodatki-pierwiastkow>
9. Rudnik S.: Metaloznawstwo, PWN, Warszawa, 1978
10. Blicharski M.: Inżynieria Materiałowa – Stal, WNT, Warszawa, 2004

*Recenzent: prof. dr hab. inż. Jan Szajnar*