

**WŁASNOŚCI MECHANICZNE I STRUKTURA ŻELIWA Z
GRAFITEM MIESZANYM PO DWUSTOPNIOWYM HARTO-
WANIU IZOTERMICZNYM**A. KRZYŃSKA¹ M. KACZOROWSKI²Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska,
ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa**STRESZCZENIE**

W artykule zaprezentowano wyniki badań otrzymane w kolejnej próbie dwustopniowego hartowania żeliwa [1,2] tym razem z grafitem mieszany, tj. sferoidalnym i wermikularnym. Z odlewów wycięto mini próbki wytrzymałościowe o średnicy w części pomiarowej 4mm. Próbki austenitizowano 60 min. w temperaturze 900°C, a następnie przeprowadzono dwa warianty dwustopniowego hartowania izotermicznego. Pierwszy z nich obejmował hartowanie izotermiczne w temperaturze $T_1^{wI} = 300^\circ\text{C}$ przez czas 10 i 30 min. a następnie w temperaturze $T_2^{wI} = 250^\circ\text{C}$ przez okres 45, 90 i 120 min. Drugi wariant obejmował hartowanie izotermiczne w temperaturze $T_1^{wII} = 250^\circ\text{C}$ przez czas 30 i 60 min. a następnie w temperaturze $T_2^{wII} = 300^\circ\text{C}$ przez 30, 60 i 90 min. Hartowanie izotermiczne „wysokotemperaturowe” (300°C) było przeprowadzone w ciekłej cynie natomiast „niskotemperaturowe” (250°C) w oleju silikonowym. Dla każdego wariantu obróbki cieplnej wykonano po trzy próbki, które poddano badaniom na maszynie wytrzymałościowej celem określenia R_m , $R_{0,2}$ i A_5 , badaniom twardości oraz obserwacjom metalograficznym.

Key words: Austempering, structure-properties relationships, mixed graphite

1. WPROWADZENIE

Żeliwo ADI otrzymuje się w wyniku hartowania izotermicznego żeliwa z grafitem kulkowym, często z dodatkiem niewielkiej ilości Ni, Mo lub Cu, wprowadzonych dla polepszenia hartowności żeliwa. Hartowanie izotermiczne przeprowadza się zwykle w temperaturze z zakresu 230-400°C, dzięki czemu otrzymuje się ausferytyczną strukturę osnowy metalowej. Temperatura i czas hartowania izotermicznego zasadniczo wpływają na własności mechaniczne żeliwa ADI, którego wytrzymałość R_m może osiągać 1600MPa i więcej przy wydłużeniu A_5 do 1%, zaś przy $R_m = 800\text{MPa}$ wydłużenie jest odpowiednio większe sięgając 10% [3]. Dla żadnego odlewnika nie jest tajemnicą, iż bardzo cennym gatunkiem żeliwa jest żeliwo z grafitem wermikularnym, które choć

¹ Dr inż. Anna Krzyńska: a.krzyńska@wip.pw.edu.pl

² Prof. dr hab. inż. Mieczysław Kaczorowski: m.kaczorowski@wip.pw.edu.pl

nie jest tak wytrzymałe jak żeliwo z grafitem kulkowym, to jednak ma lepszą niż ono zdolność tłumienia drgań oraz przewodność cieplną. Ponadto zdarza się, że w żeliwie sferoidalnym może dojść do pojawienia się zdegenerowanych form grafitu, na przykład grafitu wermikularnego. Jest interesujące, jak wielki może być wpływ tego rodzaju zakłócenia na własności mechaniczne odlewów żeliwnych, poddanych hartowaniu izotermicznemu? Autorzy nie ukrywają, iż intencją podjęcia pracy było zbadanie dwustopniowego hartowania izotermicznego żeliwa sferoidalnego. Okazało się jednak, iż, jak wspomniano w zdaniu wyżej, w żeliwie gatunku 500 7 nastąpiło zakłócenie procesu sferoidyzacji, które doprowadziło do utworzenia znacznej ilości grafitu wermikularnego. Z tego też względu zdecydowali się rozważyć wpływ jego obecności na własności mechaniczne po dwustopniowym hartowaniu izotermicznym.

2. MATERIAŁ I METODYKA BADAŃ

Do badań użyto żeliwo sferoidalne gatunku 500 7. Z odlewów wycięto mini-próbki do badań na maszynie wytrzymałościowej o średnicy w części pomiarowej 4mm. Próbki austenitzowano 60 min. w temperaturze 900°C, a następnie hartowano dwustopniowo z zastosowaniem dwóch wariantów obróbki cieplnej. Pierwszy obejmował hartowanie izotermiczne w temperaturze $T_1^{wl} = 300^\circ\text{C}$ przez 10 lub 30 minut, bezpośrednio po którym, następowało hartowanie w temperaturze $T_2^{wl} = 250^\circ\text{C}$ przez 45, 90 i 120 min. W drugim wariantcie próbki hartowano w temperaturze $T_1^{wII} = 250^\circ\text{C}$ przez 30 lub 60 minut, a następnie w temperaturze $T_2^{wII} = 300^\circ\text{C}$ przez okres 30, 60 i 90 min. Hartowanie izotermiczne „wysokotemperaturowe” (300°C) było przeprowadzone w ciekłej cynie natomiast „niskotemperaturowe” (250°C) w oleju silikonowym. Obrobione cieplnie próbki były szlifowane w części pomiarowej celem usunięcia warstwy odwęglonej i zapewnienia odpowiednio gładkiej powierzchni. W dalszej kolejności były one badane na maszynie wytrzymałościowej dla wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie, umownej granicy plastyczności oraz wydłużenia ϵ . Obok tego wykonano badania twardości HRC na twardościomierzu uniwersalnym Rockwell-Brinnell'a typ KP 15002 P. Badania strukturalne przeprowadzono obserwując zglądy metalograficzne wycięte w płaszczyźnie prostopadłej z próbek wytrzymałościowych. Obserwacje przeprowadzono na mikroskopie Olympus IX-70 stosując powiększenia od 200 do 1000 razy. Najbardziej typowe mikrostruktury zarejestrowano na zdjęciach metalograficznych.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. Wyniki badań własności mechanicznych. Badania na maszynie wytrzymałościowej

Badania na maszynie wytrzymałościowej przeprowadzono przy szybkości przesuwu trawersy 5mm/min. Wydłużenie określono na podstawie wskazań ekstensometru. Wyniki badań dla poszczególnych wariantów obróbki cieplnej przedstawia tabela 1.

Wyniki przedstawione w tabeli 1 pokazują, że podobnie jak w wypadku żeliwa ADI, próbki hartowane w pierwszym etapie w wyższej temperaturze (300°C) a w drugim w niższej temperaturze, charakteryzują się większym wydłużeniem niż próbki hartowane w temperaturze 250°C a następnie 300°C. Należy odnotować, iż wydłu-

żenie w obydwu wypadkach jest jednak wyraźnie mniejsze niż otrzymywane dla żeliwa ADI.

Tabela 1. Wyniki badań na maszynie wytrzymałościowej dla I i II wariantu OC
Table 1. The results of tensile tests for the I and II type of heat treatment

WARIANT I				
Temperatura hartowania		Własności mechaniczne		
$T_1=300^{\circ}\text{C}$	$T_2=250^{\circ}\text{C}$	$R_{0,2}^{\text{sr}}$	R_m^{sr}	ϵ^{sr}
Czas ₁ [min]	Czas ₂ [min]	[MPa]	[MPa]	[%]
10	45	958	1228	1,27
	90	1006	1261	1,39
	120	1020	1224	1,08
30	45	1040	1264	1,67
	90	1013	1217	1,34
	120	1056	1229	1,25
WARIANT II				
Temperatura hartowania		Własności mechaniczne		
$T_1=250^{\circ}\text{C}$	$T_2=300^{\circ}\text{C}$	$R_{0,2}^{\text{sr}}$	R_m^{sr}	ϵ^{sr}
Czas ₁ [min]	Czas ₂ [min]	[MPa]	[MPa]	[%]
30	30	1218	1384	0,80
	60	1238	1418	0,86
	90	1283	1439	0,83
60	30	1177	1341	0,78
	60	1218	1358	0,64
	90	1181	1324	0,62

Badania twardości

Wyniki badań twardości dla kolejnych wariantów hartowania przedstawiono w tab. 2.

Jak oczekiwano większą twardość mają próbki hartowane w pierwszym etapie w temperaturze $T_1^{\text{wII}} = 250^{\circ}\text{C}$, a następnie w temperaturze $T_2^{\text{wII}} = 300^{\circ}\text{C}$. Większa twardość żeliwa hartowanego zgodnie z wariantem II wynika najprawdopodobniej z obecności pewnej ilości martenzytu, który jest typową fazą powstająca podczas hartowania w niskiej temperaturze.

3.2. Wyniki badań strukturalnych

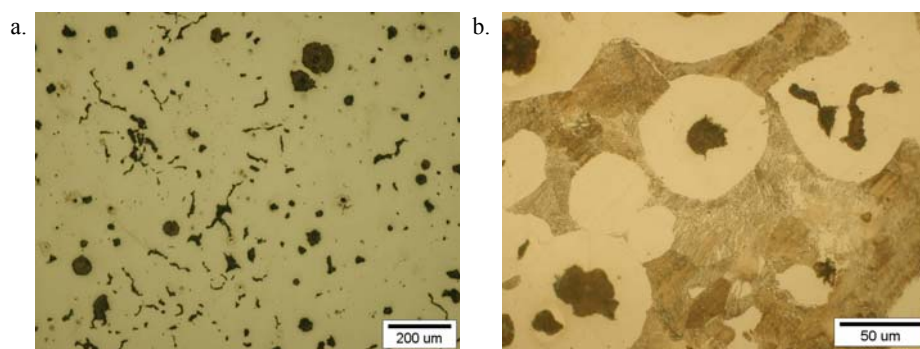
Badania strukturalne przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu metalograficznego OLYMPUS IX-70 przy powiększeniu od 100 do 1000 razy. Typowe struktury zarejestrowano na zdjęciach. Rys. 1 przedstawia mikrostrukturę materiału wyjściowego.

Ze zdjęć wynika, że obok grafitu kulkowego jest obecny grafit wermikularny, którego udział można szacować na około 50%. Osnowa metalowa żeliwa przed obróbką cieplną była ferrytyczno perlityczna. Po obu wariantach obróbki cieplnej otrzymano ausferrytyczną strukturę osnowy (Rys.2.) z wyraźnymi igłami ferrytu bainitycznego na jasnym tle austenitu szczytkowego. Z wyjątkiem pojedynczych przypadków, nie stwierdzono obecności igieł martenzytu.

Tabela 2. Wyniki badań twardości HRC dla I i II wariantu OC

Table 2. The results of hardness measurements for the I and II type of heat treatment

Wariant I				Wariant II			
$T_1^I=300^\circ\text{C}$	$T_2^I=250^\circ\text{C}$	Twardość		$T_1^{II}=250^\circ\text{C}$	$T_2^{II}=300^\circ\text{C}$	Twardość	
$t_1[\text{min}]$	$t_2[\text{min}]$	HRC _{sr}	HB	$t_1[\text{min}]$	$t_2[\text{min}]$	HRC _{sr}	HB
10	45	$33,9 \pm 1,77$	318	30	30	$37,9 \pm 2,70$	353
	90	$33,1 \pm 1,97$	311		60	$37,8 \pm 1,43$	352
	120	$30,8 \pm 3,71$	290		90	$33,8 \pm 4,39$	317
30	45	$33,6 \pm 1,69$	315	60	30	$34,1 \pm 3,29$	319
	90	$33,4 \pm 2,62$	313		60	$35,1 \pm 2,88$	328
	120	$34,4 \pm 1,65$	322		90	$36,8 \pm 2,74$	343



Rys. 1. Mikrostruktura materiału wyjściowego: a-próbka nietrawiona , b - próbka trawiona 5% roztworem 5%HNO₃ w C₂H₅OH

Fig. 1. The microstructure of cast iron without heat treatment: a – unetched, b – etched with 5%HNO₃ in ethyl alcohol

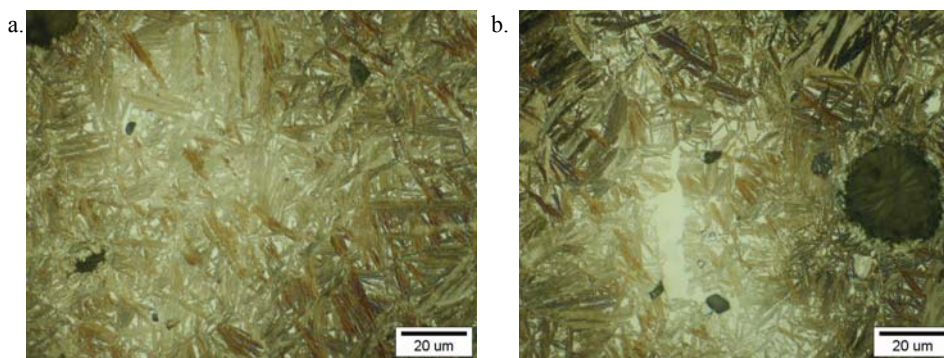
4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ I WNIOSKI

W tym punkcie skoncentrowano się przede wszystkim na porównaniu własności mechanicznych żeliwa ADI z własnościami żeliwa z grafitem mieszanym po dwustopniowym hartowaniu izotermicznym. W tym celu skorzystano z zależności między poszczególnymi właściwościami żeliwa ADI (rys.4) [4].

Jeśli na wykres zamieszczony na rys.3 nanieść minimalne i maksymalne wartości twardości HB zaczerpnięte z tabeli 2, wówczas maksymalne i minimalne wartości R_m^{\max} i R_m^{\min} wyniosą 1191 oraz 951MPa, zaś $R_{p,0.2}^{\max}$ i $R_{p,0.2}^{\min}$ odpowiednio: 975 i 723MPa. Jak wynika z tabeli 1 wartość $R_m^{\max} = 1439\text{MPa}$, a $R_m^{\min} = 1217\text{MPa}$, podczas gdy $R_{p,0.2}^{\max} = 1283\text{MPa}$, a $R_{p,0.2}^{\min} = 958\text{MPa}$. Zgodnie z wykresem zamieszczonym na rys.4, takim wartościom R_m odpowiada wydłużenie w przedziale 8 – 11%.

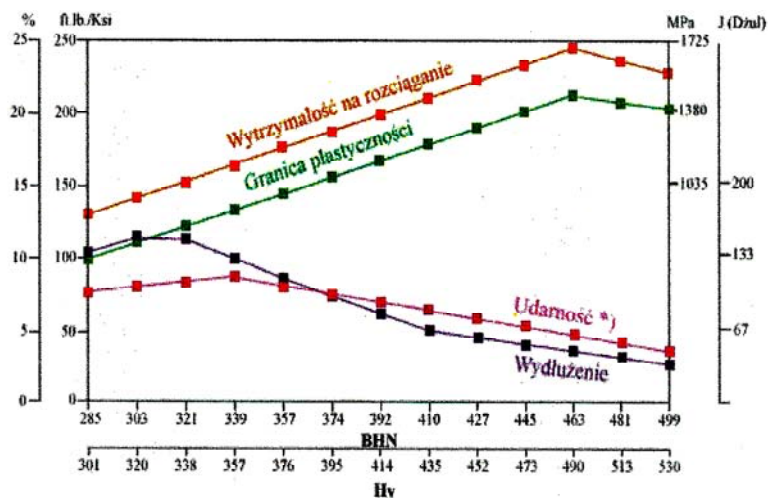
Jeśli z kolei odwołać się do wartości podanych przez normy odnoszące się do żeliwa ADI: ASTM A 897 M-90 i PN-EN 1564, wówczas wydłużenie A_5 żeliwa ADI, o

$R_m^{\min} = 1400\text{MPa}$ powinno być na poziomie 1% przy twardości w przedziale 380-480HB (tabela 3).



Rys. 2. Mikrostruktura żeliwa hartowanego dwustopniowo według wariantu I: a – 300°C (10min) + 250°C (90min), b - 300°C (30min) + 250°C (60min)

Fig. 2. The microstructure of two stage austempered cast iron: a - a – 300°C (10min) + 250°C (90min), b - 300°C (30min) + 250°C (60min)



Rys. 3. Zależność między R_m , R_e , U , wydłużeniem a twardością HB żeliwa ADI [4]

Fig. 3. The relationships between tensile and yield strength, impact resistance and elongation and Brinell hardness of ADI [4]

Wydłużenie średnie żeliwa o $R_m > 1400\text{MPa}$ wynosi średnio tylko i aż 0.83% (tabela 1). Jest ono mniejsze od wymaganego przez obie wspomniane wyżej normy, ale należy uwzględnić, że zostało wyznaczone nie standardowo, lecz za pomocą ekstensoimetru. Jeśli jednak nawet pominąć powyższe to wniosek, jaki można sformułować, jest wielce obiecujący i brzmi:

1. Obecność nawet znacznej ilości grafitu wermikularnego w żeliwie sferoidalnym nie uniemożliwia uzyskania w wyniku dwustopniowego hartowania izotermicznego żeliwa o wysokich własnościach wytrzymałościowych
2. Obecność grafitu wermikularnego powoduje umiarkowane zmniejszenie wydłużenia w porównaniu do wymagań stawianych wysokowytrzymałym gatunkom żeliwa ADI. Należy domniemywać, iż ostatni wniosek jest słuszny dopóty dopóki w żeliwie nie pojawią się wydzielenia grafitu płatkowego. Bardziej szczegółowe rozważania na ten temat zostały przedstawione w następnym artykule.

Tabela 3. Klasyfikacja żeliwa ADI wg ASTM A 897 M-90
Table 3. Classification of ADI according to ASTM A 897 M-90

Gatunek	Właściwości				
	R_m^{\min} [MPa]	$R_{p,0.2}^{\min}$ [MPa]	A_5 [%]	Udarność J/cm ²	Twardość HB
850/550/10	850	850	10	100	269 - 321
1050/700/7	1050	700	7	80	302 - 363
1200/850/4	1200	850	4	60	341 - 444
1400/1100/1	1400	1100	1	35	388 - 477
1600/1300/-	1600	1300	-	-	444 - 555

LITERATURA

- [1]. Kovacs B.V.: Heat Treating of Austempered Ductile Iron, AFS Trans., 102 (1994), p.281
- [2]. Kaczorowski M., Krzyńska.: Badania żeliwa sferoidalnego po dwustopniowym hartowaniu izotermicznym – cz. I, Archiwum Odlewnictwa PAN, vol.5, Nr 17 (2005) s. 123.
- [3]. The Sorelmetall Book of Ductile Iron, Rio Tinto Iron & Titanium Inc., Montreal, Quebec, Canada (2004)
- [4]. <http://indigo4.gr.rwth-aachen.de/tlyer/squeeze/pic3.html>.

THE MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF TWO STAGE ASUTEMPERED MIXED GRAPHITE CAST IRON

SUMMARY

The results of two stage austempered cast iron with mixed graphite (nodular and vermicular) were presented. The small samples 4mm in diameter were solution heat treated for 60min. at the 900°C. Then they were austempered in two manners. In first the samples were first 10 and 30min. quenched at the temperature $T_1^{wl}=300^\circ\text{C}$ and subsequently austempered at $T_2^{wl}=250^\circ\text{C}$ for 45, 90 and 120 minutes. In the second variant the samples were first 30 and 60min. isothermally quenched at $T_1^{wII}=250^\circ\text{C}$ and then 30, 60 and 90 minutes austempered at the temperature $T_2^{wII}=300^\circ\text{C}$. The “high-temperature” (300°C) austempering were performed at molten tin bath and the “low temperature” (250°C) austempering at silicone oil. Three specimens were used for each variant of heat treatment. These specimens were subjected to tensile test experiment for R_m , $R_{0.2}$ i A_5 evaluation. Moreover the hardness measurements and metallography observations were carried out

Recenzował: Prof. Marcin Perzyk