

# Żeliwo ADI przeznaczone do pracy w warunkach obciążenia dynamicznego

M. Sokolnicki <sup>a\*</sup>, E. Guzik <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Odlewnie Polskie S.A. Al. Wyzwolenia 70, 27-200 Starachowice, Polska

<sup>b</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, im. Stanisława Staszica,  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska

\*Kontakt korespondencyjny: e-mail: marek.sokolnicki@odlewniepolskie.pl

Otrzymano 20.11.2014, zaakceptowano do druku 12.12.2014

## Streszczenie

Żeliwo ADI posiada wiele odmian. Tematem artykułu jest najbardziej popularna odmiana ADI - (Austempered Ductile Iron) hartowanie z przemianą izotermiczną. Dzięki zastosowaniu w.w. rodzaju obróbki cieplnej uzyskuje się żeliwo o wyjątkowo korzystnych właściwościach wytrzymałościowych i plastycznych. Istotnym elementem procesu otrzymywania żeliwa wysokojakościowego jest aby w strukturze występował ausferyt.

**Słowa kluczowe:** ADI, udarność, niskie temperatury

## 1. Wprowadzenie

Żeliwo ausferytyczne sferoidalne (ADI) [1] i inne jego odmiany [2] wykorzystywane jest komercyjnie od 1970 r. [3]. Odlewy z żeliwa ADI mają właściwości porównywalne z odkuwkami stalowymi [4] i częściami stalowymi tłoczonymi i spawanymi [5].

Tabela 1. Wyciąg z normy EN-PN 1564 : 2011

Gatunek żeliwa	EN-GJS-800-10 i 800-10-RT	EN-GJS-900-8	EN-GJS-1050-6	EN-GJS-1200-3	EN-GJS-1400-1
R <sub>m</sub> , MPa	800	900	1050	1200	1400
R <sub>p0.2</sub> , MPa	500	600	700	850	1100
A <sub>5</sub> , %	10	8	6	3	1
HBW	250 - 310	280- 340	320 - 380	340-420	380-480
K, J	110	100	80	60	35

Koszty wytwarzania części odlewanych są niższe, a proces produkcyjny skomplikowanych detali jest prostszy. Żeliwo ausferytyczne (ADI) charakteryzuje się dużymi właściwościami wytrzymałościowymi i plastycznymi, jest tworzywem o wysokim potencjale dla konstrukcji lekkich, odpornych na dynamiczne obciążenia [4, 6]. Znaczne właściwości wytrzymałościowe R<sub>p0.2</sub> (800 – 1000 MPa) i plastyczne takie jak A<sub>5</sub> (min. 10 %), udarność (min. 110 J), uzyskuje się dobierając odpowiednie parametry procesowe:

- skład chemiczny żeliwa (C, Si, Cu, Ni, Mo),
- topienie, sferoidyzacja, modyfikacja (morfologia grafitu),
- obróbka cieplna: austenitizacja (temperatura, czas), ausferytyzacja (temperatura, czas).

Żeliwo ADI zawierające Cu, Ni i Mo posiada dużą udarność (115 J) przy uzyskaniu przelomu plastycznego oraz maksymalnej wartości austenitu szcztkowego w strukturze [7]. Badano wpływ krzemu na strukturę i właściwości mechaniczne żeliwa ausferytycznego [8, 9], poszukując parametrów obróbki cieplnej zapewniającej wysoką udarność. Kulkowa postać grafitu jest

najkorzystniejszą morfologią zapewniającą dużą wartość udarności żeliwa ausferrytycznego (gray iron - 9 J, vermicular cast iron - 22 J, nodular iron - 105 J) [10]. Optymalne wartości plastyczności (udarności) uzyskiwano w zakresie temperatury austenitacji 900 – 950 °C i temperaturze ausferrytacji 360 °C [11]. Zwiększone właściwości plastyczne zależą od mikrostruktury odlewu, od udziału w strukturze ilości austenitu szcążkowego [12]. Żeliwo typu ADI cechuje się również dobrą udarnością w ujemnych zakresach temperatury [13].

## 2. Metodyka badań

Do badań stosowano żeliwo pobierane z wytopów produkcyjnych. Wytopy ciekłego stopu prowadzono w piecu indukcyjnym firmy Otto Junker o pojemności 6 ton. Wsad składał się z surówki, złomu stalowego i złomu obiegowego. Skład chemiczny analizowano spektrometrem Spectrolab oraz systemem analizy termicznej ATAS. Zabieg sferoidyzowania grafityzującego ciekłego metalu przeprowadzono w kadzi smukłej o pojemności 1 tony, metodą przewodu elastycznego. Stosowano drut o średnicy 13 mm i zawartości Mg około 30 % mas. Modyfikację pierwotną przeprowadzono przy przelewaniu ciekłego stopu do kadzi zalewowej. Stosowano modyfikator barowy o masie 0,4 % w stosunku do masy metalu, oraz modyfikację wtórną (masa 0,15 %) na strugę metalu przy zalewaniu wlewków próbnych. Stosowano wlewkę próbną typu U i YII zgodnie z EN 1564:2011. Obróbkę cieplną austenitacji prowadzono w piecu komorowym (20 kW), a przemianę izotermiczną wykonywano w piecu solnym o pojemności 60 kg. Badania morfologii grafitu i osnowy metalowej żeliwa sferoidalnego w stanie lanym oraz żeliwa ausferrytycznego wykonano przy użyciu mikroskopu optycznego (NIKON). Wyznaczano właściwości mechaniczne żeliwa ausferrytycznego w tym udarności. Właściwości mechaniczne badano na próbkach wytrzymałościowych D = 10 mm, L = 120 mm, i standardowych próbkach udarnościowych z karbem V i bez karbu (EN-1564:2011). Próbę rozciągania wykonywano na maszynie wytrzymałościowej Zwick 250, a badania udarności przeprowadzono w temperaturach 20, 0, -20, -40, -60 °C. Do badań użyto młot wahadłowy typu Charpy`ego o nominalnej, początkowej energii potencjalnej 150 Nm.

Zakres badań dotyczyły 3 problemów:

- I etap – wpływ parametrów obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne żeliwa; badano wpływ temperatury austenitacji ( $T_A$ ), temperatury ausferrytacji ( $T_{AF}$ ) i czasu ausferrytacji ( $t_{AF}$ ),
- II etap – wpływ temperatury ausferrytacji na właściwości mechaniczne żeliwa, w tym udarność w temperaturach ujemnych,
- III etap – dobór parametrów obróbki cieplnej żeliwa dla zadanego gatunku żeliwa ADI.

## 3. Wyniki badań

### I etap badań

Skład chemiczny podstawowy badanego żeliwa zestawiono w tabeli 2, zaś plan doświadczeń i wyniki badań w tabeli 3.

Tabela 2. Skład chemiczny podstawowy, % mas.

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	Mo
3,4	2,3	0,17	0,034	0,01	0,047	0,7	1,5	0,24

Przeprowadzone w etapie I doświadczenia umożliwiają opracowanie równań regresji w postaci:

$$y_n = f(x_{1n}, x_{2n}, x_{3n}), \quad (1)$$

gdzie:

$y_n$ , to odpowiednio;  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$ ,  $A$ , HBW,  $K$ ,  
 $x_{1n}$ ,  $x_{2n}$ ,  $x_{3n}$ , odpowiadają; to  $T_A$ ,  $T_{AF}$ ,  $t_{AF}$ .

Tabela 3. Plan doświadczeń i wyniki badań

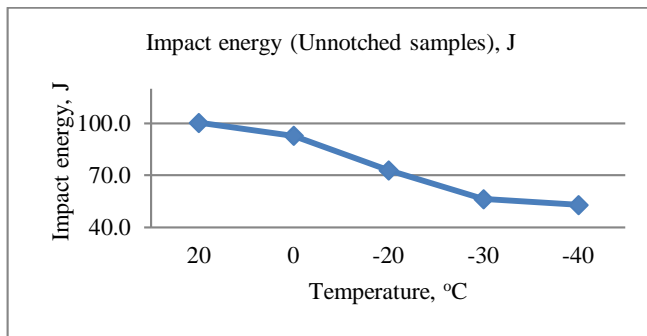
Parametr / Nr zabiegu hartowania	$x_n$			$y_n$					
	$T_A$	$T_{AF}$	$t_{AF}$	$R_{p0,2}$	$R_m$	$A_5$	HB	$K$	
	°C	°C	h	MPa	MPa	%		J	
1	950	360	6	724	1039	20,4	321	144	
2	850	360	6	564	788	10,3	302	134	
3	950	300	6	906	1284	5,8	388	120	
4	850	300	6	825	1065	4,2	277	126	
5	950	360	2	825	1068	17,5	302	145	
6	850	360	2	618	847	8,7	294	128	
7	950	300	2	971	1287	10,7	388	128	
8	850	300	2	880	1120	6,9	302	121	
9	900	330	4	877	1153	11,3	352	138	
10	900	330	4	870	1156	12,8	352	143	
11	900	330	4	867	1158	11,3	370	147	

W etapie II badano właściwości żeliwa poddanego austenitacji w temperaturze  $T_A = 900$  °C przez okres 2 godz., a następnie przeprowadzono jego obróbkę z przemianą izotermiczną w temperaturze 240, 270, 310 i 360 °C; każdy zabieg trwał 120 min. Wyniki badań zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Właściwości mechaniczne żeliwa ausferrytycznego po hartowaniu z przemianą izotermiczną

$T_{AF}$	$R_{p0,2}$ MPa	$R_m$ , MPa	$A_5$ , %	$K^{*})$ J	HBW/10
240	1072	1507	2,8	54,4	429
270	936	1372	4,1	71,6	388
310	804	1132	5,4	84,4	341
360	652	1028	10,0	123,6	285

$K^{*})$  - unnotched impact energy



Rys. 1. Udarność żeliwa ausferrytycznego (ADI) w różnych wartościach temperatury

Ocenę udarności żeliwa ADI w obniżonych temperatury przeprowadzono na próbkach austenitizowanych;  $T_A = 900$  °C przez 120 min, a następnie wprowadzono je do kąpielii solnej o temperaturze 360 °C na okres 120 min. Wyniki udarności zestawiono na rys. 1.

W etapie III badań uwzględniono wymagania stawiane przez konstruktorów, porównujących żeliwo ADI gatunku EN-GJS-1200-3 z gatunkami staliwa konstrukcyjnego. Badaniom poddano żeliwo z dwóch wytopów; dla odlewów o ściance 40 mm ( $C = 3,3$  % mas) i 20 mm ( $C = 3,5$  % mas). Oceniano udarność żeliwa w temperaturach pokojowych i obniżonych na próbkach z karbem. Badaniom poddano żeliwo o składzie zestawionym w tabeli 5.

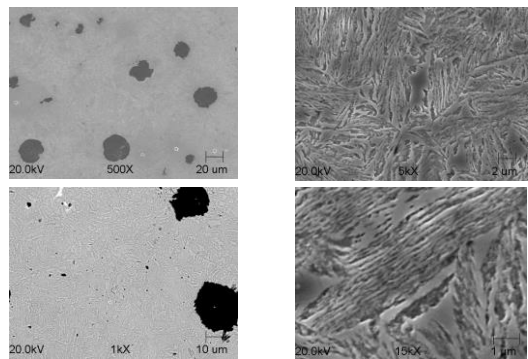
Tabela 5. Skład chemiczny żeliwa, % mas.

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni	Mo
3,5	2,5	0,16	0,04	0,01	0,047	0,7	1,5	0,24
3,3	2,7	0,09	0,04	0,01	0,059	0,6	1,3	0,21

Próbki wycięte z wlewków „Y” o grubościach 40 i 20 mm austenitizowano w temperaturze  $T_A = 950$  °C a następnie hartowano izotermicznie w temperaturze  $T_{AF} = 300$  °C przez 2 h. Właściwości mechaniczne zestawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Właściwości mechaniczne żeliwa ADI

Grubość ścianki mm	$R_{p0,2}$ MPa	$R_m$ MPa	$A_5$ %	KCV, J/cm <sup>2</sup>		HBW
				+20 °C	-60 °C	
40	1044	1312	1,8	16,3	9,6	388
40	980	1262	2,1	16,3	10,2	388
20	1069	1323	2,1	15,6	13,7	388
20	1029	1336	1,4	18,0	13,7	388



Rys. 2. Mikrostruktura żeliwa:  $T_A = 900$  °C  $T_{AF} = 330$  °C,  $t_{AF} 4h$

## 4. Dyskusja wyników

Przeprowadzone badania (I etap) umożliwiają opisać wpływ parametrów obróbki cieplnej na właściwości mechaniczne wg zależności:

$$R_m = 564,37 + 2,14 \cdot T_A - 4,2 \cdot T_{AF} - 9,12 \cdot t_{AF}, \text{ MPa}, \quad (2)$$

$$A_5 = -3,24 + 0,06 \cdot T_A - 0,12 \cdot T_{AF} - 0,20 \cdot t_{AF}, \text{ \%}, \quad (3)$$

$$K = -6,01 + 0,065 \cdot T_A + 0,235 \cdot T_{AF} + 0,155 \cdot t_{AF}, \text{ J/cm}^2. \quad (4)$$

Potwierdza się korzystny wpływ temperatury austenitizacji ( $T_A$ ) na parametry wytrzymałościowe i plastyczne żeliwa. Dobierając odpowiednią temperaturę ausferrytacji można uzyskać różne gatunki żeliwa ADI (tabela 4). Również żeliwo w gatunku EN-GJS-1050-6 jest tworzywem o wysokiej udarności w temperaturach obniżonych ( $K^{-60} > 50$  J). Żeliwo ADI o wysokiej plastyczności jest stosowane jako zamiennik staliwa niskostopowego konstrukcyjnego (tabela 6).

## 5. Podsumowanie

Otrzymane mniejsze wartości udarności w niskich wartościach temperatury, są efektem przemiany niestabilnego austenitu w martenzyt dla danej temperatury testowej.

Otrzymane właściwości żeliwa ausferrytycznego (ADI) w temperaturze otoczenia zależą od morfologii wydzieleni ausferrytu które z kolei są związane z temperaturą ausferrytacji im niższa to odległości między płytkowe są mniejsze a stąd wytrzymałość i twardość jest większa zaś właściwości plastyczne niższe. W przypadku wyższej temperatury ausferrytacji właściwości mechaniczne są odwrotne – wartości wytrzymałości i twardości maleją, a wydłużenia i udarności rosną.

## Podziękowania

Praca współfinansowana w ramach program POIG w latach 2007-2013.

## Literatura

- [1] PN-EN 1564 (2012), Founding - Ausferritic spheroidal graphite cast irons
- [2] Guzik, E. (2010). Żeliwo ausferrytyczne i jego odmiany – struktura i wybrane właściwości, Archives of Foundry Engineering
- [3] Keough, J.R. & Hayrynen, K.L. (2008). Austempering of Cast Irons – Developments Properties and Applications, 68<sup>th</sup> World Foundry Congress, pp. 23-27
- [4] Guzik, E. (2001). Some selected problems concerning the processes of cast iron improvement. Polish Academy of Sciences, Branch Katowice, Foundry Commission, Monograph, No. 1M, pp. 128
- [5] Seaton, P.B. & Xiao-Ming, L. (2002). An ADI Alternative for a Heavy Duty Truck Lower Control Arm, World Conference on ADI
- [6] Roerig, K. (2002). ADI – ein Leichtbauwerkstoff mit hohem Potential, Giesserei-Rundschau 49, Heft 11/12
- [7] Eric, O., Sidjanin, L., Miskowic, Z., Zes, S., Janowic, M.T. (2004). Microstructure and toughness of CuNiMo austempered ductile iron, Material Letters 01/2004; DOI:10.1016/j.matled. 2004.02.041
- [8] Malia, J., Grech, M. (1997). Effect of silicon content on impact properties of austempered ductile iron, Materials Science and Technology, 04/1997
- [9] Min-Su Kim, Do-Hoon Lee, Sang-Yun Shin and Byung-Joon Ye, Effects of Si Content on the Microstructure and Processing Window of Austempered Ductile Cast Iron
- [10] Ghaderi, A.R., Nili Ahmadabadi, M., Ghasemi, H.M. (2003). Effect of graphite morphologies on the tribological behaviour of austempered cast iron, Wear 255, 410-416
- [11] Della, M., Alaalam, M. & Grech, M. (1998). Effect of Austenitizing Conditions on the Impact Properties of an Alloyed Austempered Ductile Iron of Initially Matrix Structure, Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 7 (20, April 1998 – 265)
- [12] Ratto, P.J.J., Ansaldi, A.F., Fierro, V.E., Aguera, F.R., Villar H.N. & Sikora, J.A. (2001). Low Temperature Impact Test in Austempered Ductile Iron and Other Spheroidal Graphite Cast Iron Structures, ISIJ International, Vol. 41, No. 4
- [13] Ravishankar, K.S., Rajenda Udupa K. & Prasad Rao, P. (2008). Development of Austempered Ductile Iron for High Tensile and Fracture toughness by Two Step Austempering Process, 68th WFC – World Foundry Congress 7th – 10th February, 2008, pp. 35-40

# Austempered Ductile Iron to Work in the Conditions of Dynamic Load

## Abstract

ADI makes an alternative to steel casting for constructors. High mechanical properties of ADI compare with parameters of quenched and tempered structural cast steel. A factor that is decisive for replacing steel casting with cast iron is elongation. For castings used in temperatures below 0 °C a specified level of impact energy in negative temperature is needed. Impact energy in low temperature ausferritic cast iron was evaluated on samples without notch, with notch V and notch U. The research was carried out in temperatures +20 °C, 0 °C, -20 °C, -40 °C and -60 °C. Two kinds of cast iron were evaluated: GJS-800-10 and GJS-1200-3 Grade. The value of temperature transition zone for high and low impact energy was evaluated. ADI cast iron was chosen, as one that can successfully replace the low-alloyed structural cast steel in low temperature conditions.