

Wpływ temperatury łamania na udarność żeliwa ADI

T. Giętka*, K. Ciechacki, T. Szykowny

Zakład Inżynierii Materiałowej, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: tgiotka@utp.edu.pl

Otrzymano 27.05.2015; zaakceptowano do druku 01.06.2015

Streszczenie

W publikacji podjęto próbę zbadania wpływu temperatury łamania w temperaturach 20°C, 0°C i –20°C, na udarność żeliwa ADI. Do otrzymania żeliwa ADI użyto dwa wytopy żeliwa sferoidalnego różniące się składem chemicznym. Pierwszy zawierał oprócz pierwiastków podstawowych dodatkowo 0,48% Cu, drugi zaś 0,51% Cu i 0,72% Ni. Wariant obróbczy polegał na jednostopniowym austenitowaniu w temperaturze $t_{\gamma} = 900^{\circ}\text{C}$, podchładzaniu do temperatury przemiany izotermicznej 375°C i wytrzymywaniu w czasie od 15 do 90 min.

Keywords: ADI, Udarność, Skład chemiczny, Austenitowanie

1. Wprowadzenie

W procesie wytwarzania odlewów z żeliwa ADI stosuje się hartowanie z przemianą izotermiczną (w zakresie od 250 do 400°C), w celu wytworzenia w osnowie wysokowęglowego austenitu i przesyconego węglem ferrytu. Taki skład mikrostruktury nazywa się ausferytem, a proces izotermicznej przemiany przechłodzonego austenitu – ausferytyzowaniem [1-6].

W operacji hartowania żeliwa zabieg austenitowania, polegający na wygrzaniu w temperaturze wyższej od A_{c1} , powinien wzbogacić austenit w węgiel do granicy wyznaczonej linią E'S' i ujednorodnić osnowę metalową. Podczas wygrzewania żeliwa o wejściowej mikrostrukturze ferrytycznej do austenitu dyfundują wyłącznie atomy węgla, pochodzące z wydzieliń grafitu. Proces austenitowania osnowy metalowej i rolę grafitu w jej nawęglaniu opisano w pracy [2].

Efekt austenitowania żeliwa jest zależny od składu chemicznego, struktury wejściowej, dyspersji grafitu kulkowego, temperatury i czasu wygrzewania, a także od jednorodności rozmieszczenia pierwiastków w ziarnach eutektycznych

i rozmiaru ziaren osnowy. Klasycznym sposobem austenitowania żeliwa przed przemianą izotermiczną jest austenitowanie jednostopniowe [1, 2, 7].

Analiza wpływu udziału austenitu na udarność lub energię uderzenia żeliwa ADI, przy uwzględnieniu temperatury austenitowania, temperatury i czasu ausferytyzowania w zakresie ausferytu górnego i ausferytu dolnego była przedmiotem badań w pracy [2, 5, 6, 8].

Skład chemiczny żeliwa sferoidalnego niestopowego ogranicza się przede wszystkim do zawartości C, Si, Mn, S i P. Z punktu widzenia austenitowania przy hartowaniu izotermicznym szczególnie znaczenie ma węgiel, krzem i mangan.

W celu zwiększenia czasu przedziału obróbki i tym samym udziału austenitu w osnowie żeliwa ADI wprowadzano następujące pierwiastki: Mn, Mo i Cu [2, 4, 5] oraz Cu i Ni [8].

Praca ma na celu zbadanie wpływu temperatury łamania na uzyskaną wartość udarności dla dwóch gatunków żeliwa sferoidalnego hartowanego izotermicznie.

Problematyka badania jest bezpośrednio związana z jakością tworzywa odlewniczego w procesie wytwarzania.

2. Materiał, program i metodyka badawcza

Do badań przyjęto dwa wytopy (W1, W2) żeliwa sferoidalnego. Żeliwo wytopiono w piecu indukcyjnym średniej częstotliwości o pojemności 3,5 tony. Sferoidyzację żeliwa przeprowadzono przy użyciu zaprawy magnezowej VL53M (metodą dzwonową w kadzi smukłej) a modyfikację żelazokrzemem FeSi75. Żeliwo odlano do form wilgotnych odtwarzających próbki YII zgodnie z PN-EN 1563:2012. Skład chemiczny trzech wytopów żeliwa określono spektroskopowo przedstawia tabela 1.

Tabela 1.

Skład chemiczny wytopów żeliwa, % mas.

Ozn.	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu	Ni
W1	3,41	2,62	0,30	0,046	0,016	0,056	0,48	-
W2	3,39	2,62	0,29	0,042	0,010	0,036	0,51	0,72

Wartości temperatur krytycznych żeliwa wyznaczonych dylatometrycznie podczas ciągłego nagrzewania i chłodzenia ze stałą prędkością (0,019 K/s) przedstawia tabela 2.

Tabela 2.

Wartości temperatur krytycznych żeliwa w stanie odlanym, °C

Ozn.	Ac _{1,1}	Ac _{1,2}	Ar _{1,1}	Ar _{1,2}
W1	804	884	812	708
W2	788	862	820	729

Właściwości mechaniczne przedstawia tabela 3.

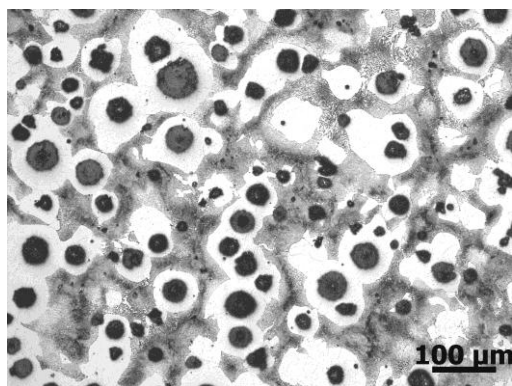
Tabela 3.

Właściwości mechaniczne

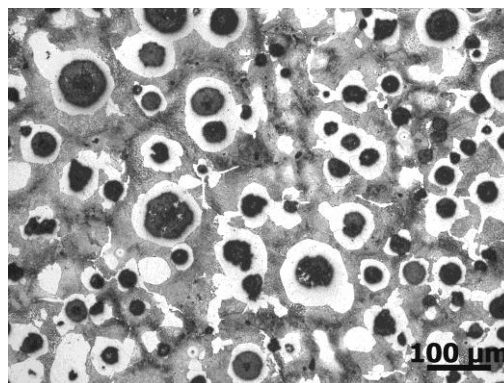
Ozn.	Właściwości mechaniczne				Gatunek żeliwa zgodny z PN EN 1563:2012 dla t ≤ 30 mm
	R _m , MPa	R _{p0,2} , MPa	A ₅ , %	HB	
W1	565	388	7,6	201	EN-GJS-500-7
W2	656	464	3,2	252	EN-GJS-600-3

Mikrostrukturę wytopów żeliwa w stanie odlanym przedstawiono na rysunku 1.

a)

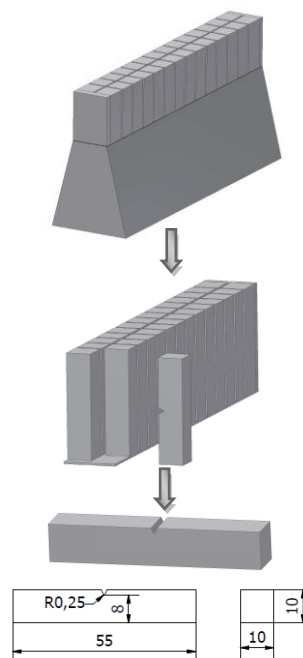


b)



Rys. 1. Mikrostruktura wytopów żeliwa w stanie odlanym, traw. 2% HNO₃; a) W1, b) W2

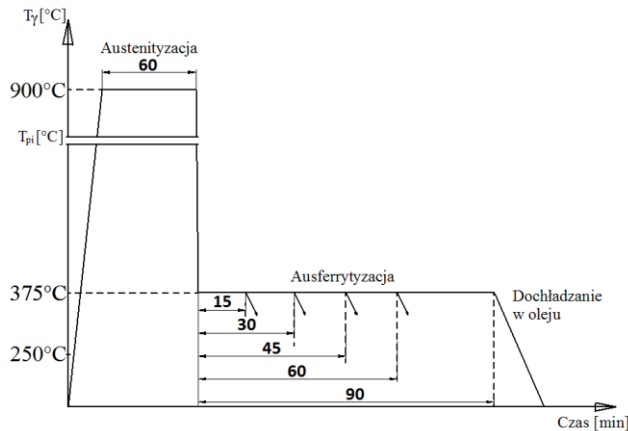
Wlewki YII pocięto zgodnie z rysunkiem 2 wykonując próbki udarnościovie z karbem V o wymiarach 10x10x55 mm.



Rys. 2. Schemat pobrania i wykonania próbek udarnościovych

Próbki udarnościovie hartowano z przemianą izotermiczną zgodnie ze schematem podanym na rysunkach 3. Dla każdego przypadku obróbki pomiary udarności wykonywano na trzech próbkach, pochodzących z jednego wlewka YII. Austenitowanie przeprowadzono w piecu komorowym sylitowym, natomiast ausferytyzowanie – w piecu wannowym z kąpielą solną SO140. Wybór temperatury przemiany izotermicznej wynikał z przeglądu literatury [8]. Autorzy pracy [8] badali wpływ temperatury austenitowania i przemiany izotermicznej dla dwóch wytopów (0,6% Cu oraz 0,6% Cu

i 1,0%Ni). Próba łamania realizowana była na próbkach bez karbu tylko w temperaturze otoczenia.



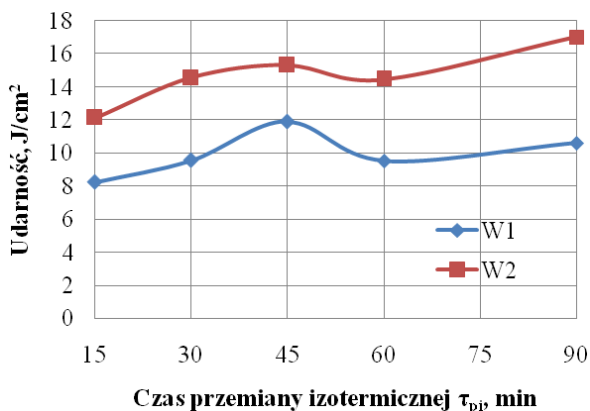
Rys. 3. Schemat hartowania z przemianą izotermiczną żeliwa sferoidalnego próbek udarnościoowych

Próbie udarności przeprowadzono na młocie Charpy'ego typ PSW 300 o maksymalnej energii uderzenia 300 J.

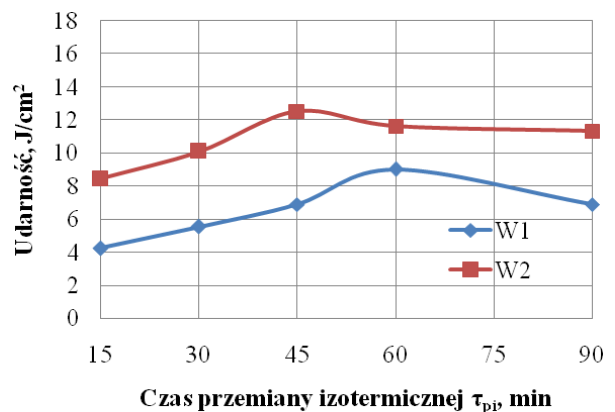
Wybrane przełomy próbek udarnościoowych obserwowano za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM).

3. Wyniki badań i ich analiza

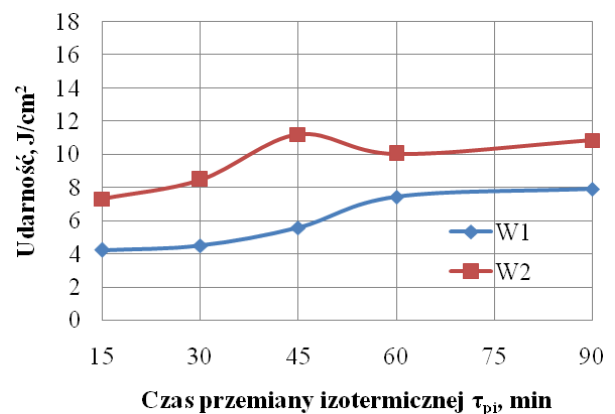
Udarność w funkcji czasu wychładzania izotermicznego w temperaturze łamania 20°C, 0°C i -20°C przedstawiono na rysunkach 4÷6.



Rys. 4. Udarność w funkcji czasu przemiany izotermicznej dla dwóch wytopów, temperatura łamania 20°C



Rys. 5. Udarność w funkcji czasu przemiany izotermicznej dla dwóch wytopów, temperatura łamania 0°C



Rys. 6. Udarność w funkcji czasu przemiany izotermicznej dla dwóch wytopów, temperatura łamania -20°C

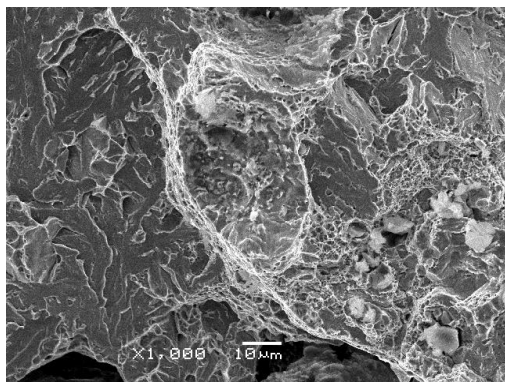
Wraz ze wzrostem czasu wytrzymywania izotermicznego próbek w kąpeli solnej wartość udarności rośnie. Reguła ta jest zachowana dla wszystkich warunków temperatury łamania (20°C, 0°C i -20°C). Porównując wytopy pomiędzy sobą można stwierdzić jednoznacznie, że większe wartości udarności uzyskał wytop W2 zawierający 0,51% Cu i 0,72% Ni.

Porównanie obrazów fraktograficznych dla wytopu W1 i W2 przedstawione zostało na rysunkach 7 ÷ 12. Przełomy różnią się znacznie pomiędzy sobą.

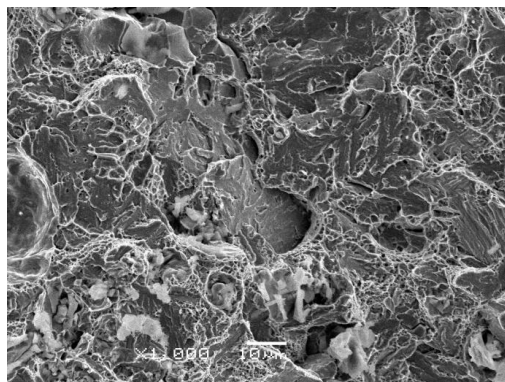
Obraz zarejestrowany na rysunku 7 przedstawia przełom transkryystaliczny o charakterze ciągliwym i łupliwym. Pęknięcie ciągliwe znajduje się po prawej stronie obrazu na zboczu nierówności. W topografii powierzchni występują liczne wgłębienia. Na powierzchni pęknięcia łupliwego (lewa strona rys. 7) widoczne są ślady pęknięć międzykryształicznych i duża ilość uskoków na granicy bloków.

Obniżenie temperatury łamania próbek (rysunek 8 i 9) powoduje zanik występowania obszarów charakteryzujących się przełomem ciągliwym.

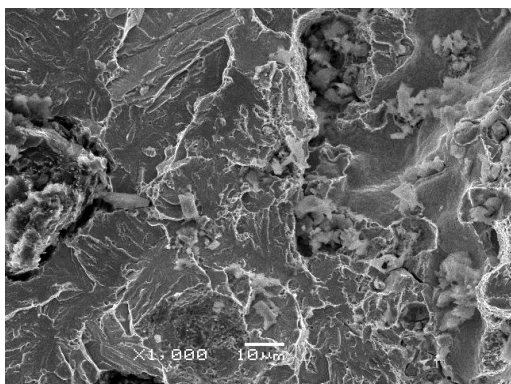
W przypadku próbek pochodzących z wytopu W2 (rysunek 10, 11) charakter przełomu jest zbliżony. Występują obszary z mieszaną budową.



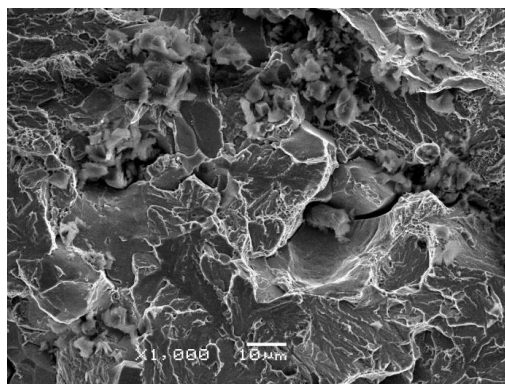
Rys. 7. Przełom żeliwa sferoidalnego hartowanego izotermicznie w temperaturze $T_{pi}=375^{\circ}\text{C}$ przez czas $\tau_{pi}=45$ min, temperatura łamania 20°C , pow. mikro. 1000x (wytop - W1)



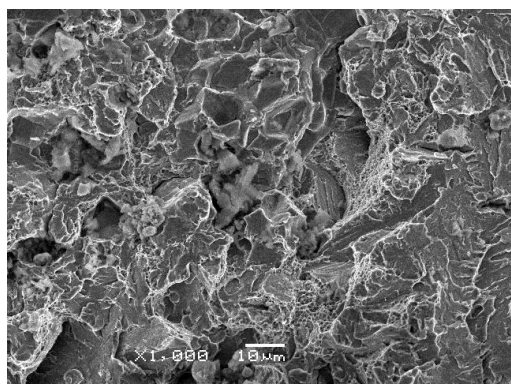
Rys. 10. Przełom żeliwa sferoidalnego hartowanego izotermicznie w temperaturze $T_{pi}=375^{\circ}\text{C}$ przez czas $\tau_{pi}=45$ min, temperatura łamania 20°C , pow. mikro. 1000x (wytop - W2)



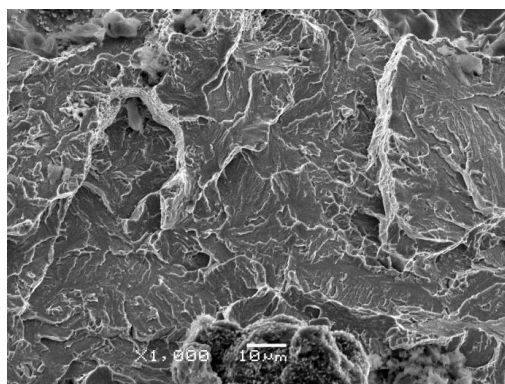
Rys. 8. Przełom żeliwa sferoidalnego hartowanego izotermicznie w temperaturze $T_{pi}=375^{\circ}\text{C}$ przez czas $\tau_{pi}=45$ min, temperatura łamania 0°C , pow. mikro. 1000x (wytop - W1)



Rys. 11. Przełom żeliwa sferoidalnego hartowanego izotermicznie w temperaturze $T_{pi}=375^{\circ}\text{C}$ przez czas $\tau_{pi}=45$ min, temperatura łamania 0°C , pow. mikro. 1000x (wytop - W2)



Rys. 9. Przełom żeliwa sferoidalnego hartowanego izotermicznie w temperaturze $T_{pi}=375^{\circ}\text{C}$ przez czas $\tau_{pi}=45$ min, temperatura łamania -20°C , pow. mikro. 1000x (wytop - W1)



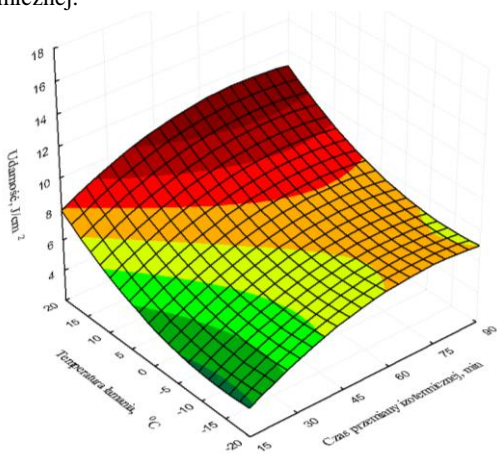
Rys. 12. Przełom żeliwa sferoidalnego hartowanego izotermicznie w temperaturze $T_{pi}=375^{\circ}\text{C}$ przez czas $\tau_{pi}=45$ min, temperatura łamania -20°C , pow. mikro. 1000x (wytop - W2)

Porównując mikrofraktografię zdjęć zarejestrowanych dla wytopu W1 i W2 można stwierdzić, że próbki z wytopu 2 posiadają mocniej rozwiniętą powierzchnię przełomu. Przekłada się to na większe wartości udarności.

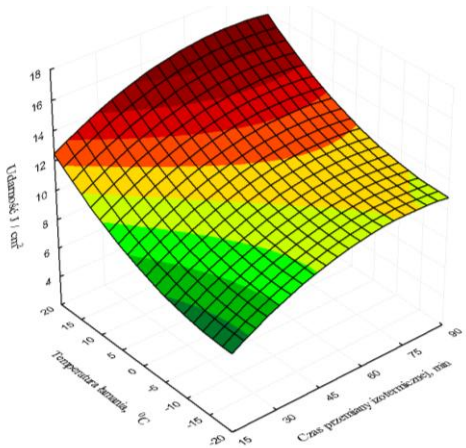
Do porównania wyników udarności wykonano analizę statystyczną. Celem analizy eksperymentalnej było wyznaczenie równania obiektu badań o postaci funkcji aproksymującej. Jako funkcji użyto wielomianu algebraicznego drugiego stopnia z podwójną interakcją (1) o postaci:

$$z = m_0 + m_1 \cdot x_1 + m_2 \cdot x_2 + m_3 \cdot x_1^2 + m_4 \cdot x_2^2 + m_5 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (1)$$

Analizę korelacji statystycznych oparto na weryfikacji korelacji kwantytatywnej oznaczającej istnienie zależności między wielkościami wejściowymi, a wielkościami wyjściowymi, które mają postać funkcji obiektu badań. Przyjęto poziom ufności $p = 0,05$ ($\alpha = 95\%$). Otrzymane równania matematyczne otrzymano w wyniku weryfikacji istotności i adekwatności modelu matematycznego, w którym analizowano wpływ temperatury łamania próbek i czasu przemiany izotermicznej.



Rys. 13. Wpływ temperatury łamania i czasu przemiany izotermicznej na udarność żeliwa pochodzącego z wytopu W1



Rys. 14. Wpływ temperatury łamania i czasu przemiany izotermicznej na udarność żeliwa pochodzącego z wytopu W2

Równania matematyczne oraz współczynniki korelacji i determinacji dla wykresów umieszczonych na rysunkach 13 i 14 przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4.

Funkcje matematyczne (KCV) oraz współczynniki korelacji i determinacji w zależności od składu chemicznego wytopu

Wytop	Funkcja matematyczna	r	r^2
W1	$KCV = 2,53 + 0,14 \cdot t_L + 0,10 \cdot \tau_{pi} - 0,97e^{-3} \cdot t_L^2 + 0,004 \cdot \tau_{pi}^2$	0,934	0,873
W2	$KCV = 6,52 + 0,15 \cdot t_L + 0,13 \cdot \tau_{pi} - 0,001 \cdot t_L^2 + 0,003 \cdot \tau_{pi}^2$	0,962	0,925

gdzie:

KCV – udarność dla próbek z karbem V, J/cm²;

t_L – temperatura łamania próbki, °C;

τ_{pi} – czas przemiany izotermicznej, min;

r – współczynnik korelacji;

r^2 – współczynnik determinacji.

Charakter wykresów przedstawionych na rysunkach 13 i 14 jest zbliżony. Nakładając dwie warstwy na siebie można byłoby zauważyć ich równoległość w zakresie określonych zmiennych. Otrzymane wartości współczynników korelacji i determinacji świadczą o ścisłej zależności temperatury łamania z czasem przemiany izotermicznej.

4. Zakończenie

Skład chemiczny i temperatura łamania wpływają bezpośrednio na udarność żeliwa ADI. Dla pełniejszego poznania zjawiska należałoby wykonać dodatkowo rentgenowskie badania strukturalne w celu określenia objętościowego udziału austenitu w badanych próbkach. Wpływ temperatury łamania próbek na udarność żeliwa ADI w kolejnych badaniach powinien być rozszerzony o próby zawierające mikrostruktury z dolnym ausferytem. Wydłużenie czasu przemiany izotermicznej powyżej 45 minut nie wpływa na wartość udarności.

Udział pęknięć ciągłych i łupliwych na powierzchniach przelomów badanych próbek wykazuje wyraźny związek ze strukturą żeliwa. Na przelomach próbek o dużej udarności znajdują się pęknięcia trans krystaliczne ciągłe. Ich udział wprost proporcjonalnie rośnie z wartością udarności. Cechy morfologiczne przelomów i ich lokalizację w strukturze żeliwa ADI można przypisać obszarom, w których występuje segregacja pierwiastków np. na granicach ziarn eutektycznych.

Z analizy mikrofraktograficznej wynika, że odporność na udarowe pękanie jest uwarunkowane składem produktów przemiany izotermicznej austenitu w ziarnie eutektycznym. Jeżeli to stwierdzenie potwierdzi się w kolejnych badaniach to może się okazać, że zwiększenie udziału austenitu w osnowie nie będzie gwarantowało dużej plastyczności żeliwa ADI.

Literatura

- [1] Batra, U., Ray, S. & Prabhakar, S.R. (2004). Tensile properties of copper alloyed austempered ductile iron. Effect of austempering parameters. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 13(5), 537-541.
- [2] Dymski, S. (1999). *Kształtowanie struktury i właściwości mechanicznych żeliwa sferoidalnego podczas izotermicznej przemiany bainitycznej*. Rozprawy nr 95. Bydgoszcz: ATR.
- [3] Dymski, S., Giętka, T. & Stawicka, Z. (2006). Analiza statystyczna wpływu składu chemicznego na własności mechaniczne żeliwa ADI. Cz. I. Żeliwo niestopowe. *Archiwum Odlewnictwa*. 6(18) (2/2), 117-128.
- [4] Dymski, S., Giętka, T. & Stawicka, Z. (2006). Analiza statystyczna wpływu składu chemicznego na własności mechaniczne żeliwa ADI. Cz. II. Żeliwo stopowe. *Archiwum Odlewnictwa*. 6(18) (2/2), 111-116.
- [5] Dymski, S., Ławrynowicz, Z. & Giętka, T. (2006). Udarność żeliwa ADI. *Archiwum Odlewnictwa*. 6(21), 369-376.
- [6] Klöpffer, C. (2006). *Untersuchungen zur Zerspanbarkeit von austenitisch-ferritischem Gusseisen mit Kugelgraphit (ADI)*. Aachen University, Dissertation.
- [7] Guzik, E. (2001). *Procesy uszlachetniania żeliwa. Wybrane zagadnienia*. Monografia nr 1M. Archiwum Odlewnictwa. Katowice: PAN.
- [8] Batra, U., Ray, S. & Prabhakar, S.R. (2007). Impact properties of copper-alloyed and nickel-copper alloyed ADI. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 16(4), 485-489.
- [9] Ratto, P.J.J., Ansaldi, A.F., Fierro, V.E., Agüera, F.R., Villar, H.N.A. & Sikora, J.A. (2001). Low temperature impact test in austempered ductile iron and other spheroidal graphite cast iron structures. *ISIJ International*. 4, 372-380.
- [10] Ravishankar, K.S., Rajendra 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, 35-40.