

POLSKA AKADEMIA NAUK
KOMITET BUDOWY MASZYN
SEKCJA PODSTAW W TECHNOLOGII
AKADEMIA TECHNICZNO-ROLNICZA
W BYDGOSZCZY
WYDZIAŁ MECHANICZNY



*ADI, metalurgia, hartowanie, parametry,
własności mechaniczne, zastosowanie*

Stanisław DYMSKI*

WYBRANE ASPEKTY Z ZAKRESU BADAŃ ŻELIWA ADI

W pracy przedstawiono wybrane problemy związane z produkcją żeliwa sferoidalnego hartowanego z przemianą izotermiczną (ADI). Kształtowanie struktury osnowy i własności wynika z doboru parametrów operacji obróbki cieplnej. Na jakość żeliwa ADI, obok obróbki cieplnej, wpływa także obróbka metalurgiczna. Pokazano zastosowanie żeliwa ADI na niektóre odlewy części maszyn i urządzeń.

1. WPROWADZENIE

Żeliwo sferoidalne jest tworzywem odlewniczym, któremu towarzyszy duże zainteresowanie na całym świecie. Świadczy o tym duża liczba publikacji dotyczących tego stopu, jak też organizowanie monotematycznych konferencji naukowych na jego temat. W Polsce odbyły się w latach 2000 i 2003 dwie międzynarodowe konferencje naukowe, zorganizowane przez Instytut Odlewnictwa w Krakowie.

Hartowane żeliwo sferoidalne z przemianą izotermiczną, o założonej strukturze osnowy, z przewagą ausferrytu, nazywane jest żeliwem ADI (skrót z ang. Austempered Ductile Iron). Struktura osnowy metalowej, składająca się z austenitu wysokowęglowego i ferrytu, w obecności grafitu kulkowego powoduje bardzo korzystne skojarzenie wytrzymałości i plastyczności. Grafit kulkowy w osnowie żeliwa ADI, podobnie jak w żeliwie sferoidalnym, tłumí drgania. Odlewy w stanie surowym mają lepszą skrawalność. Ze względu na obecność w osnowie ausferrytu, żeliwo odznacza się dobrą odpornością na ścieranie (zużycie ab-

* Katedra Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny, Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy

razyjne) w porównaniu z ulepszonym cieplnie żeliwem sferoidalnym, stałą hartowaną z przemianą izotermiczną oraz stałą ulepszoną cieplnie. Żeliwo ADI ma mniejszą o około 10% gęstość w porównaniu z innymi stopami Fe-C, np. stałą i staliwem [9,11,16].

Lepsze własności wytrzymałościowe i plastyczne nowoczesnego tworzywa odlewniczego jakim jest ausferrytyczne żeliwo (ADI) łączą się z wynikami obróbki metalurgicznej i obróbki cieplnej, polegającej na przemianie przechłodzonego austenitu w zakresie bainitycznym [3,9,21].

Celem pracy jest zaprezentowanie nowych najważniejszych procesów, operacji i zabiegów związanych z technologią otrzymywania żeliwa ADI oraz jego własności użytkowych, a także podanie niektórych przykładów zastosowania.

2. OBRÓBKA METALURGICZNA

Ciekłe żeliwo o określonym składzie chemicznym poddawane jest zabiegowi sferoidyzowania. Po odlaniu do formy otrzymuje się odlew o określonych gabarytach i kształcie. Udział grafitu kulkowego na powierzchni zglądu metalograficznego winien wynosić około 95%. Osnowa metalowa powinna być perlityczna lub perlityczno-ferrytyczna [9,11,21]. Są badania, które informują o ferrytycznej strukturze wyjściowej żeliwa sferoidalnego [3].

W celu zwiększenia hartowności żeliwa odlewów grubościennych skład chemiczny wzbogaca się o takie pierwiastki, jak: Mo, Ni i Cu. Jeżeli wymagana jest zwiększona odporność na zużycie ścierne, to wówczas wprowadza się Cr i V.

Problematykę doboru składu chemicznego przedstawiono w pracach [3,22,23].

Ważnym zabiegiem metalurgicznym jest wprowadzenie do ciekłego żeliwa magnezu lub jego stopów w celu sferoidyzacji oraz przeprowadzenie odpowiedniego zabiegu modyfikowania grafityzującego. Szereg metod realizacji zabiegu podano w pracach [10,23]. Natomiast do nowoczesnych zabiegów sferoidyzacji żeliwa, obecnie stosowanych zarówno w kraju, jak i za granicą, zaliczana jest metoda przewodu elastycznego PE zwana „drutową” [8].

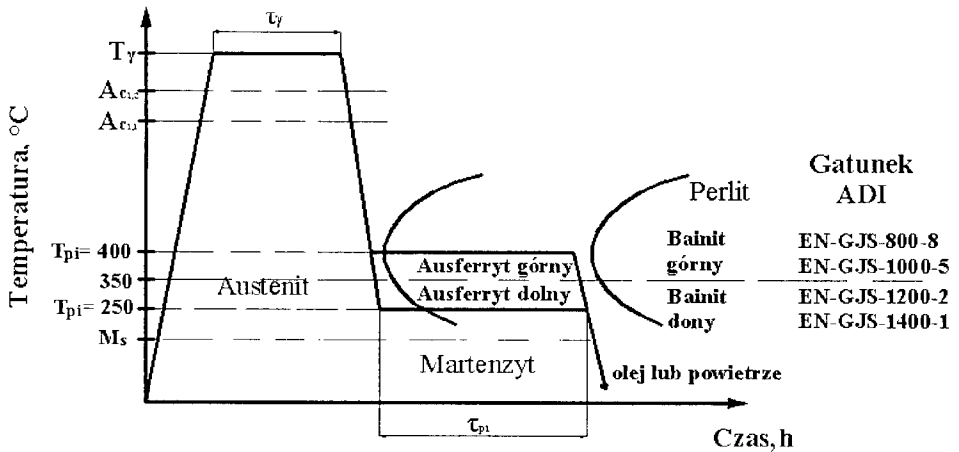
Na proces wytwarzania wyjściowego żeliwa do obróbki cieplnej ADI duży wpływ mają czynniki towarzyszące obróbce metalurgicznej żeliwa sferoidalnego. Na wyniki tej obróbki, oprócz jej parametrów, wpływa jakość samego żeliwa, w tym struktura jego osnowy po odlaniu.

Odlewy złej jakości nie nadają się do hartowania, gdyż żeliwo nie osiągnie odpowiedniego standardu zgodnego z PN-EN 1564. Stąd odlewy surowe nie mogą mieć takich wad, jak: porowatość, wydzielenia cementytu eutektycznego czy wtrącenia niemetaliczne.

Wdrożenie produkcji odlewów z ADI wymaga opanowania procesów metalurgicznych, technologiczno-odlewniczych oraz wyposażenia w odpowiednie urządzenia techniczne do obróbki cieplnej [9].

3. OBRÓBKA CIEPLNA

Odlewy żeliwa sferoidalnego hartuje się z przemianą izotermiczną. Operacja ta polega na austenitowaniu, najczęściej w temperaturze z zakresu $810\div 950^{\circ}\text{C}$ (T_{γ}), wygrzewaniu w czasie τ_{γ} , a następnie podchładzaniu do temperatury przemiany izotermicznej, zazwyczaj z zakresu $400\div 250^{\circ}\text{C}$ (T_{pi}), wytrzymywaniu przez odpowiedni okres czasu τ_{pi} . Podchładzanie i wytrzymywanie odbywa się w kąpeli solnej lub złożu fluidalnym. Schemat hartowania z przemianą izotermiczną pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat hartowania z przemianą izotermiczną żeliwa sferoidalnego
Fig. 1. Schematic diagram of austempering heat treatment cycle

W zależności od parametrów przemiany izotermicznej można otrzymać, według PN-EN 1564, 4 gatunki żeliwa ADI, o symbolach: EN-GSJ-800-8, EN-GJS-1000-5, EN-GJS-1200-5 i EN-GSJ-1400-1. Pierwsza wartość liczbową określa wytrzymałość na rozciąganie R_m w MPa, a druga – minimalne wydłużenie A_5 w %.

W pracach [16,20] informuje się o gatunku Carbodic ADI (CADI), w którym osnowa składa się z ausferytu i węglików, gatunku ADI 800 (ausferyt i ferryt przedeutektoidalny) oraz gatunku DADI. Ten ostatni otrzymano przez bezpośrednie hartowanie izotermiczne po wybitciu z formy.

Wprowadzenie do obróbki cieplnej dodatkowego zabiegu – powierzchniowego odkształcenia plastycznego w zakresie austenitu, spowodowało dodatkowo wzrost wytrzymałości i plastyczności żeliwa AADI [2].

We Włoszech Odlewnia Zanardi Fonderia [28] w ciągu roku produkuje 9.000 ton odlewów, przy czym wszystkie po obróbce cieplnej są obrabiane mechanicznie. Asortyment produkcyjny przedstawia się następująco:

- ADI 800 (EN-GSJ-800-8) – 37%,
- ADI 1030 (EN-GSJ-1000-5) – 46%,
- ADI 1200 (EN-GSJ-1200-2) – 13%,
- ADI 1400/1600 (EN-GSJ-1400-1) – 4%.

Jak z tego wynika, w produkcji dominują (stanowiąc łącznie 83%) odlewy żeliwa ADI z gatunków o mniejszej wytrzymałości $R_m = 800 \pm 1000$ MPa.

W wielu krajach produkcja odlewów żeliwa ADI zwiększa się. Na przełomie wieku produkcję tę szacowano na poziomie 125.000 ton. Uwzględniając ciągły postęp techniczny i zainteresowanie konstruktorów przewiduje się, że w 2010 r. potencjał produkcyjny będzie wynosił 300.000 ton [16]. W Polsce technologia otrzymywania tego żeliwa jest dobrze znana. Wśród konstruktorów i technologów występuje pełna świadomość o jego własnościach użytkowych i możliwości aplikacji.

W Instytucie Odlewnictwa w Krakowie od 1998 r. jest eksploatowana linia technologiczna do operacji hartowania z przemianą izotermiczną odlewów żeliwa ADI [24]. W Polsce do tej pory zainteresowanie odlewami ADI jest małe, lecz zakładając przyszłościowy wzrost gospodarczy należy liczyć się z jego wzrostem.

Optymalizacja parametrów operacji cieplnej – hartowania z przemianą izotermiczną, takich jak:

- temperatura austenityzowania T_γ ,
- czas austenityzowania τ_γ ,
- temperatura przemiany izotermicznej T_{pi} ,
- czas przemiany izotermicznej τ_{pi} ,

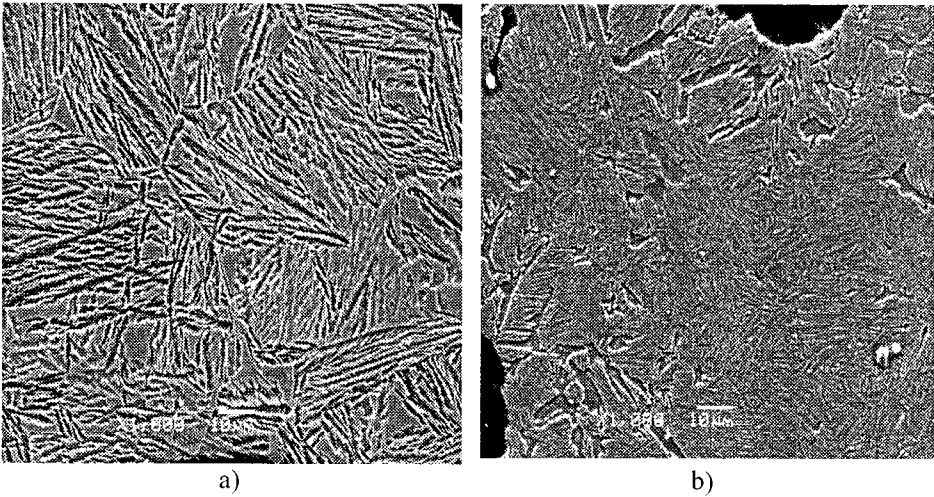
prorowadzi do otrzymania standardowego gatunku żeliwa ADI.

Konsekwencją wytrzymałości w temperaturze przemiany izotermicznej jest kształtowanie struktury osnowy metalowej żeliwa. Zagadnienie to było przedmiotem wielu badań zarówno w kraju, jak i za granicą [1,3,7,9,11,12,14,17,21,22]. Jednym z ważnych składników struktury jest austenit szczątkowy (zwany też wysokowęglowym austenitem), którego udział w osnowie decyduje o plastyczności żeliwa ADI. Jego udział wyznacza się za pomocą rentgenografii strukturalnej [1,3,7,12,14], różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC) [6] i modelowania za pomocą sieci neuronowej [26,27].

Przy odkształceniu plastycznym poślizg dyslokacji odbywa się zazwyczaj w płaszczyznach o największej gęstości atomów; w austenicie są to płaszczyzny $\{111\}$ i leżące w nich kierunki $\langle 110 \rangle$. Natomiast w ferrycie poślizg dyslokacji odbywa się w płaszczyznach $\{110\}$, $\{112\}$ lub $\{123\}$ i wynika to z tego, że w strukturze krystalicznej ferrytu nie ma płaszczyzn o największej gęstości atomów. Z tego powodu udział fazy γ jest odpowiedzialny za duży poziom wskaźników plastyczności żeliwa ADI.

W obróbce cieplnej żeliwa ADI optymalna struktura osnowy metalowej wynika z temperatury hartowania [11]:

- $T_{pi} = 400 \div 350^\circ\text{C}$, a w górnym ausferycie jest 40% austenitu i 60% ferrytu,
 - $T_{pi} = 300 \div 250^\circ\text{C}$, a w dolnym ausferycie jest 10% austenitu i 90% ferrytu.
- Strukturę ausferytu żeliwa ADI przedstawiono na rysunku 2.



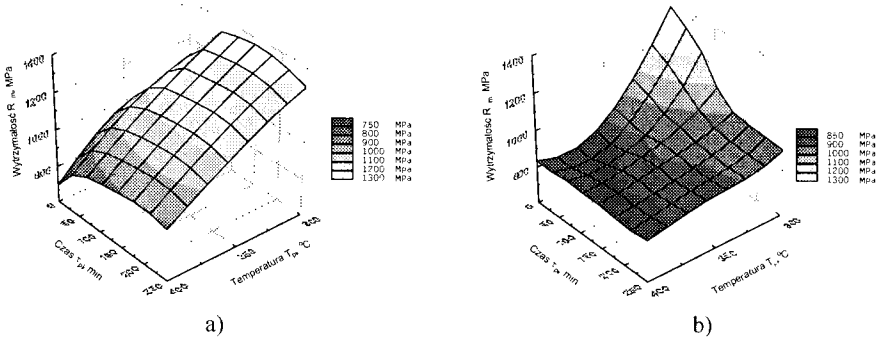
Rys. 2. Górny ausferyt żeliwa ADI hartowanego z $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ w temperaturze $T_{pi} = 400^\circ\text{C}$ i czasie wytrzymywania $\tau_{pi} = 120$ min (a). Dolny ausferyt i ferryt żeliwa ADI hartowanego z $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$ w temperaturze $T_{pi} = 325^\circ\text{C}$ i czasie wygrzewania $\tau_{pi} = 60$ min (b). Mikroskop skaningowy – powiększenie $1000\times$

Fig. 2. Microstructure of the upper ausferrite hardening ADI in $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$, austempered $T_{pi} = 400^\circ\text{C}$ at of the time $\tau_{pi} = 120$ min (a). Microstructure of the lower ausferrite and ferrite hardening ADI in $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$, austempered $T_{pi} = 325^\circ\text{C}$ at stand of the time $\tau_{pi} = 60$ min (b). SEM $1000\times$

Ausferytyczna osnowa tworzy niezwykle atrakcyjną z punktu widzenia właściwości kombinację wytrzymałości, twardości, plastyczności i odporności na pękanie żeliwa ADI. Stąd zagadnienie kształtowania wskaźników własności mechanicznych było przedmiotem wielu badań, m.in. [1,3,4,5,7,9,11,13, 15,17, 19,20].

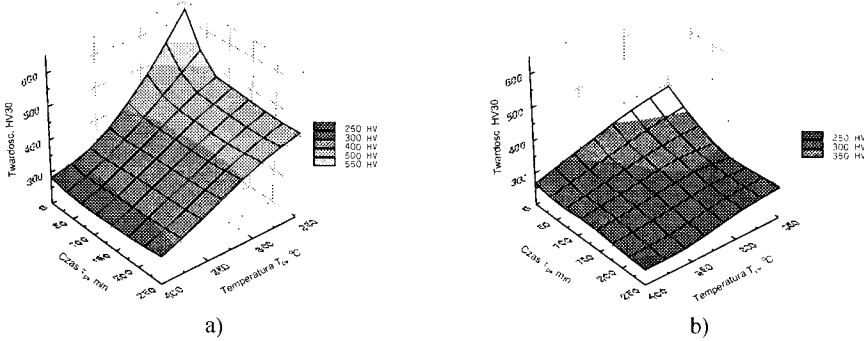
Hartowane z przemianą izotermiczną niestopowe żeliwo sferoidalne w stanie wyjściowym miało strukturę ferrytyczną po dwustopniowym ferrytyzowaniu.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wpływ temperatury i czasu przemiany izotermicznej na wytrzymałość i twardość żeliwa ADI hartowanego z $T_\gamma = 950$ i 830°C .



Rys. 3. Wpływ temperatury T_{pi} i czasu τ_{pi} przemiany izotermicznej na wytrzymałość na rozciąganie R_m żeliwa ADI hartowanego z temperatury $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ (a) i $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$ (b)

Fig. 3. Influence of austempering temperature T_{pi} and time τ_{pi} on tensile strength UTS in ADI hardened from temperatures: $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ (a) and 830°C (b)



Rys. 4. Wpływ temperatury T_{pi} i czasu τ_{pi} przemiany izotermicznej na twardość żeliwa ADI hartowanego z temperatury $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ (a) i $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$ (b)

Fig. 4. Influence of austempering temperature T_{pi} and time τ_{pi} on hardness in ADI hardened from temperatures: $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ (a) and 830°C (b)

Dla własności plastycznych i udarności żeliwa ADI wyznaczono za pomocą statystycznej analizy korelacyjnej funkcje matematyczne o postaci [5]:

– dla wydłużenia żeliwa ADI hartowanego z temperatury $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$

$$A_{950^\circ\text{C}} = -7,477 + 2,61 \cdot 10^{-2} T_{pi} + 4,1 \cdot 10^{-2} \tau_{pi} - 1,4 \cdot 10^{-4} \tau_{pi}^2, \% \quad (1)$$

– dla wydłużenia żeliwa ADI hartowanego z temperatury $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$

$$A_{830^\circ\text{C}} = -95,38 + 5,596 \cdot 10^{-1} T_{pi} - 7,6 \cdot 10^{-4} T_{pi}^2 - 2 \cdot 10^{-5} \tau_{pi}^2, \% \quad (2)$$

- dla przewężenia żeliwa ADI hartowanego z temperatury T_γ w zakresie 950÷ 830°C

$$Z_{950-830^\circ\text{C}} = -8,976 \cdot 10^{-2} T_{p_i} + 7,533 \cdot 10^{-5} T_{p_i}^2 + \\ -1,1816 \cdot 10^{-4} \tau_{p_i}^2 - 1,197 \cdot 10^{-4} T_\gamma \cdot T_{p_i} + 3,3688 \cdot 10^{-5} T_\gamma \cdot \tau_{p_i}, \quad \% \quad (3)$$

- dla udarności żeliwa ADI hartowanego z temperatury $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$

$$KCG_{950^\circ\text{C}} = -662,03 + 3,99 T_{p_i} + 5,4238 \cdot 10^{-1} \tau_{p_i} + \\ - 5,69 \cdot 10^{-3} T_{p_i}^2 - 1,6 \cdot 10^{-3} \tau_{p_i}^2, \quad J/cm^2 \quad (4)$$

- dla udarności żeliwa ADI hartowanego z temperatury $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$

$$KCG_{830^\circ\text{C}} = -1080 + 6,117 \cdot T_{p_i} + 1,57 \tau_{p_i} - 7,06 \cdot 10^{-3} \tau_{p_i}^2 + \\ - 4,97 \cdot 10^{-3} T_{p_i} \cdot \tau_{p_i}, \quad J/cm^2 \quad (5)$$

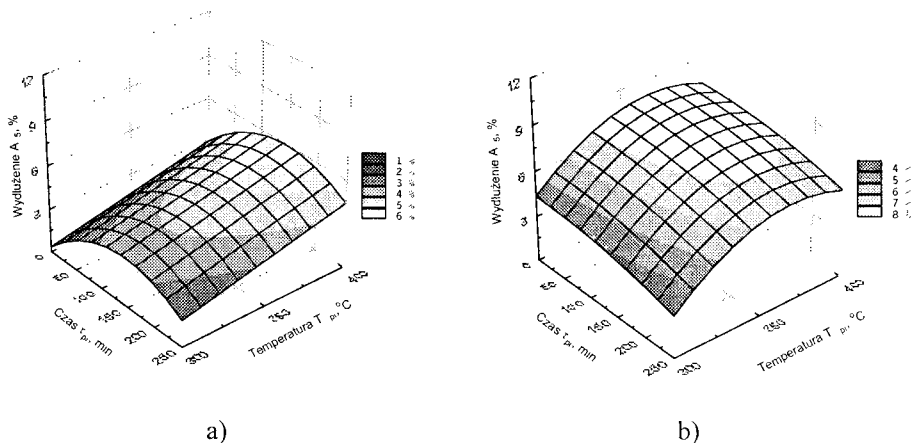
gdzie:

- T_γ – temperatura austenitowania, °C,
- T_{p_i} – temperatura przemiany izotermicznej, °C,
- τ_{p_i} – czas przemiany izotermicznej, min.

Własności plastyczne i udarność żeliwa ADI po austenitowaniu w temperaturze $T_\gamma = 950$ i 830°C w zależności od parametrów wytrzymywania w temperaturze przemiany izotermicznej przedstawiono na rysunkach 5÷7. Wykresy przestrzenne wykonano korzystając z zależności (1÷5).

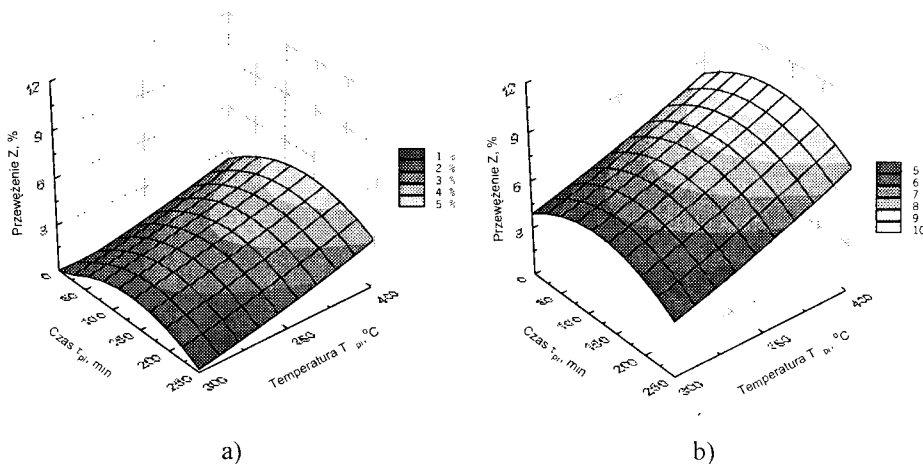
Hartowanie z temperatury $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$ zmniejsza nieznacznie wytrzymałość i twardość w porównaniu z hartowaniem z temperatury $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$, lecz równocześnie następuje zwiększenie wydłużenia A_5 i przewężenia Z , w niektórych przypadkach aż 2- lub 3-krotnie. Niestopowe ferrytyzowane żeliwo sferoidalne po hartowaniu z $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$, w optymalnych warunkach przemiany izotermicznej, osiągnęło wytrzymałość i wydłużenie odpowiadające gatunkowi EN-GJS-800-8. Natomiast po hartowaniu z $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ – gatunkowi EN-GJS-1000-5.

Struktura osnowy żeliwa hartowanego z temperatury $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$ składała się z ferrytu bainitycznego i austenitu szczątkowego na całych obszarach ziaren eutektycznych oraz wolnego ferrytu. Taki skład osnowy przyczynił się do wyjątkowo korzystnej kombinacji wytrzymałości i plastyczności oraz udarności. Twardość takiego żeliwa umożliwia jego obróbkę skrawaniem, co w kontekście prac [16,28] takie żeliwo ADI jest bardzo pożądane, ponieważ w porównaniu do pozostałych gatunków, jest w znacznym stopniu (37%) wykorzystywane w praktyce przemysłowej. Dodatkową zaletą tego rodzaju żeliwa ADI (ADI 800 [16]) jest jego duża udarność (rys. 7).



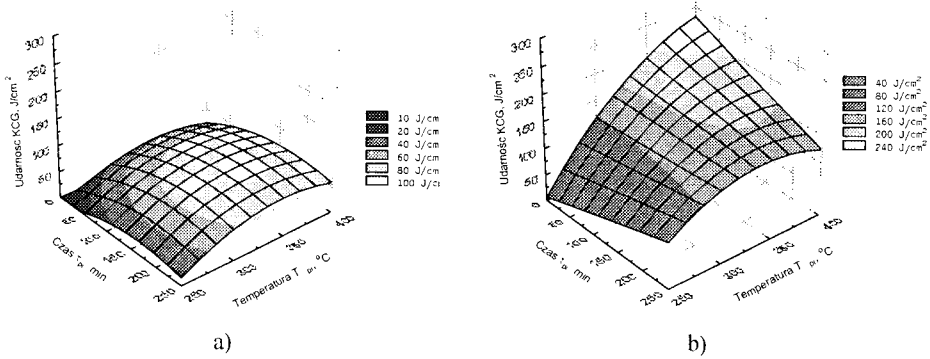
Rys. 5. Wpływ parametrów przemiany izotermicznej (T_{pi} i τ_{pi}) na wydłużenie A_5 żeliwa ADI hartowanego z temperatury $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ (a) i $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$ (b)

Fig. 5. Influence of parameters of isothermal transformation (T_{pi} and τ_{pi}) on elongation A_5 in ADI hardened from temperatures $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ (a) and 830°C (b)



Rys. 6. Wpływ parametrów przemiany izotermicznej (T_{pi} i τ_{pi}) na przewężenie Z żeliwa ADI hartowanego z temperatury $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ (a) i $T_\gamma = 830^\circ\text{C}$ (b)

Fig. 6. Influence of parameters of isothermal transformation (T_{pi} and τ_{pi}) on reduction of area in ADI hardened from temperatures $T_\gamma = 950^\circ\text{C}$ (a) and 830°C (b)

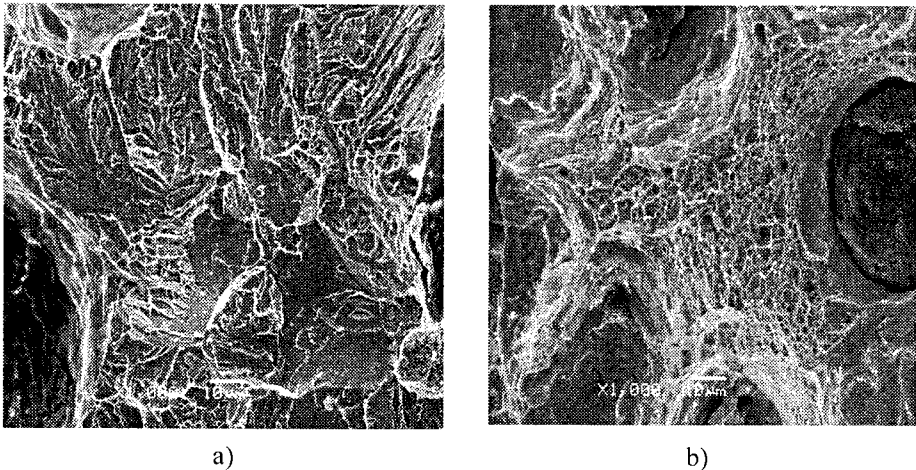


Rys. 7. Wpływ parametrów przemiany izotermicznej (T_{pi} i τ_{pi}) na udamność KCG żeliwa ADI hartowanego z temperatury $T_{\gamma} = 950^{\circ}\text{C}$ (a) i $T_{\gamma} = 830^{\circ}\text{C}$ (b)

Fig. 7. Influence of parameters of isothermal transformation (T_{pi} and τ_{pi}) on impact strength KCG in ADI hardened from temperatures $T_{\gamma} = 950^{\circ}\text{C}$ (a) and 830°C (b)

Próbki udamnościowe miały różne rodzaje przełomów na powierzchni rozdziału. Na powierzchni złomów były przełomy transkryystaliczne ciągłe i łupliwe oraz w mniejszości – przełomy międzyziarniste.

Na rysunku 8 przedstawiono przełomy wybranych próbek udamnościowych żeliwa ADI.



Rys. 8. Przełomy próbek udamnościowych żeliwa ADI hartowanego z: $T_{\gamma} = 950^{\circ}\text{C}$ i wytrzymywanego w $T_{pi} = 400^{\circ}\text{C}$ w czasie $\tau_{pi} = 30$ min (a), $T_{\gamma} = 830^{\circ}\text{C}$ i wytrzymywanego w $T_{pi} = 350^{\circ}\text{C}$ w czasie $\tau_{pi} = 30$ min (b). Mikroskop skaningowy – powiększenie 1000×

Fig. 8. The fracture samples on standard impact test hardening ADI in: $T_{\gamma} = 950^{\circ}\text{C}$, austempered $T_{pi} = 400^{\circ}\text{C}$ at of the time $\tau_{pi} = 30$ min (a), $T_{\gamma} = 830^{\circ}\text{C}$, austempered $T_{pi} = 350^{\circ}\text{C}$ at of the time $\tau_{pi} = 30$ min (b). SEM 1000×

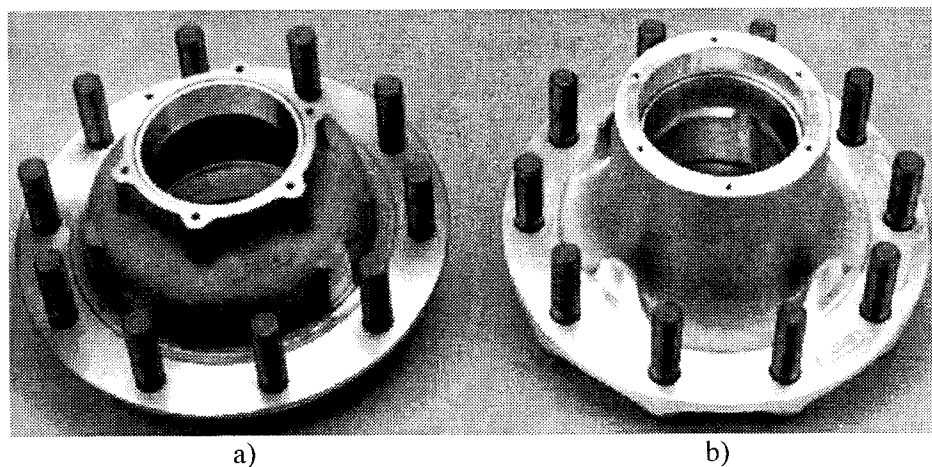
4. ZASTOSOWANIE ŻELIWA ADI

Pomimo że produkcja odlewów z żeliwa ADI nie należy do łatwych od strony techniczno-ekonomicznej, to źródła literaturowe informują o jej zwiększaniu nie tylko w krajach wysoko uprzemysłowionych.

Z obszarów stosowania żeliwa ADI można podać następujące kategorie [1]:

- poprawienie wskaźników własności mechanicznych żeliwa sferoidalnego,
- zamiany walcowej stali, staliwa, odkuwek stalowych, stopów aluminium lub innych stopów na żeliwo ADI w istniejących konstrukcjach inżynierskich,
- projektowania w budowie maszyn w oparciu o standardy żeliwa ADI zawarte w PN-EN 1564.

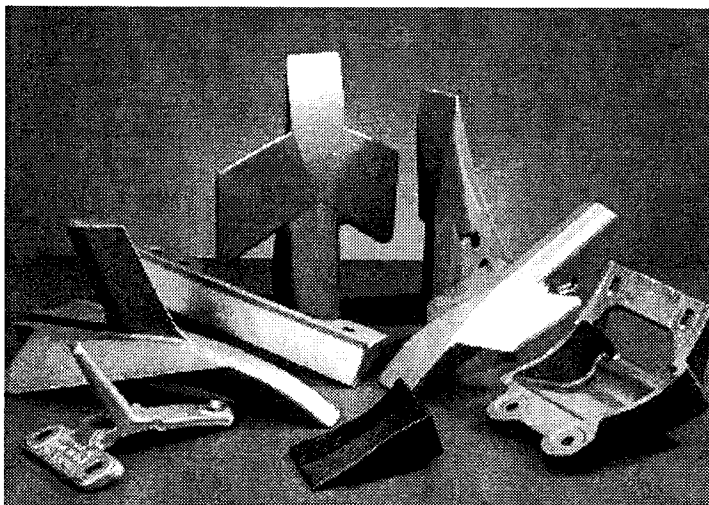
Zastosowanie żeliwa ADI na odlewy piasty koła samochodu ciężarowego zamiast stopu Al stało się uzasadnione ze względu na 3 razy większą wytrzymałość R_m i wydłużenie A_5 żeliwa w porównaniu ze stopem Al. Ponadto dzięki tej zamianie zmniejszono masę odlewu o 3%, a koszty wytwarzania o 30%.



Rys. 9. Odlewy piasty koła samochodu ciężarowego, wykonane z żeliwa ADI (a) i stopu Al (b) [18]

Fig. 9. Castings of the wheels centre motor truck made of ADI (a) and alloy Al (b) [18]

W literaturze technicznej spotyka się informacje, że z żeliwa ADI wykonuje się odlewy części maszyn: kół zębatych, wałów korbowych oraz elementów napędów i układów zawieszenia w samochodach, części maszyn używanych w budownictwie, kolejnictwie, przy robotach ziemnych, do urabiania kopalin, wiertniczych i włókienniczych, a także w maszynach i narzędziach dla rolnictwa (rys. 10) itd.



Rys. 10. Odlewy ADI w budowie maszyn rolniczych [29]

Fig. 10. ADI castings of mechanical engineering agriculture [29]

Na części odporne na ścieranie (zużycie abrazyjne) stosuje się żeliwo CADI, które w osnowie ausferytycznej ma węgliki (rys.11).

W pracach [9,11,21,25,29] zobrazowano możliwie pełną listę przykładów zastosowania odlewów z żeliwa ADI.



Rys. 11. Odlewy części maszyn wykonane z żeliwa CADI [29]

Fig. 11. Castings of machines construction from CADI [29]

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione problemy badawcze nad żeliwem ADI wiążą się z technologią tego atrakcyjnego odlewniczego tworzywa konstrukcyjnego. Obróbka cieplna żeliwa sferoidalnego pozwala na kształtowanie ausferytycznej struktury osnowy metalowej, która z kolei wpływa na wielkość wskaźników wytrzymałości, plastyczności i twardości, odporności na pękanie i na ścieranie. Wysoki poziom tych własności powoduje konkurencyjność żeliwa wobec tradycyjnych materiałów inżynierskich stosowanych w budowie maszyn i urządzeń.

Jak pokazały przykłady krajów uprzemysłowionych, zamiana stosowanych dotychczas materiałów na odlewy z żeliwa ADI przyniosła racjonalne korzyści techniczno-ekonomiczne i ekologiczne, m.in. ze względu na mniejsze zapotrzebowanie na surowce i nośniki energii.

LITERATURA

- [1] Bayati H., Elliott R., 1997. Role of austenite in promoting ductility in an austempered ductile iron. *Materials Science and Technology* 13, 19.
- [2] Dettloff S.M. i wsp., 2001. Ausforming Austempered Ductile Iron. International Scientific Conference „ADI – Foundry’s offer for designers and users of castings”, Foundry Research Institute Kraków, II/1.
- [3] Dymski S., 1999. Kształtowanie struktury i własności mechanicznych żeliwa sferoidalnego podczas izotermicznej przemiany bainitycznej. Rozprawy 95, Wyd. Uczeln. ATR w Bydgoszczy.
- [4] Dymski S., 2001. Niektóre aspekty umocnienia osnowy niestopowego żeliwa ADI. II Pomorska Konferencja Materiałowa Gdańsk – Sobieszewo, 60.
- [5] Dymski S., 2004. Badanie wpływu parametrów hartowania na wybrane własności mechaniczne żeliwa ADI. *Archiwum Odlewnictwa* 4 (12), 155.
- [6] Gazda A., 2003. Określenie udziału objętościowego austenitu szczątkowego w żelwie ADI metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC). International Scientific Conference „Ductile Iron of the 21st Century”, Foundry Research Institute Kraków, I/35.
- [7] Grech M., Young J.M., 1990. Effect of austenitising temperature on tensile properties of Cu-Ni austempered ductile iron. *Materials Science and Technology* 6, 416.
- [8] Guzik E., 2001. Wdrożenie techniki PE sferoidyzacji żeliwa w krajowych odlewniach. *Zesz. Nauk. ATR w Bydgoszczy, Mechanika* 50, 153.
- [9] Guzik E., 2001. Procesy uszlachetniania żeliwa. Wybrane zagadnienia. *Archiwum Odlewnictwa PAN Oddział Katowice, Monografia* 1M, 128.
- [10] Guzik E., Podrzucki C., 1996. Mat. III Seminarium nt. „Prognozy rozwoju odlewnictwa w Polsce na tle tendencji światowych” Szczyrk, ref. 10, s. 101.
- [11] Guzik S.E., 2003. Żeliwo ausferytyczne jako nowoczesne tworzywo konstrukcyjne. *Inżynieria Materiałowa* 6, 677.

- [12] Hamid Ali A.S., Elliott R., 1996. Austempering of on Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron. Part 1 – Austempering kinetics and processing window. *Materials Science and Technology*, Vol. 12, August, 679.
- [13] Hamid Ali A.S., Elliott R., 1996: Austempering of on Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron. Part 2 – Structure – mechanical property relationships. *Materials Science and Technology*, Vol. 12, September, 780.
- [14] Hamid Ali A.S., Elliott R., 1996. Influence of austenitising temperature on austempering of an Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron. Part 1 – Austempering kinetics and processing window. *Materials Science and Technology*, Vol. 12, December, 1021.
- [15] Hamid Ali A.S., Elliott R., 1997. Influence of austenitising temperature on austempering of an Mn-Mo-Cu alloyed ductile iron. Part 2 – Mechanical properties. *Materials Science and Technology*, Vol. 13, January, 24.
- [16] Hayrynen K.L., 2003. Opportunities for austempered ductile iron (ADI). *International Scientific Conference „Ductile Iron of the 21st Century”*, Foundry Research Institute Kraków, 1/1.
- [17] Kowalski A., 2003. Badania i zastosowanie żeliwa ADI w Polsce w aspekcie prac prowadzonych w Instytucie Odlewnictwa w Krakowie. *International Scientific Conference „Ductile Iron of the 21st Century”*, Foundry Research Institute Kraków, 1/19.
- [18] Maffia J., 2004. Thinking Thin with Grees Sond Cast Iron. *Engineered Casting Solutions Winter 2004*, 44.
- [19] Mallia J., Grech M., 1990. Effect of silicon content impact properties of austempered ductile iron. *Materials Science and Technology*, Vol. 3, May, 408.
- [20] Myszka D. i wsp., 2003. Zastosowanie metody bezpośredniego hartowania izotermicznego żeliwa sferoidalnego. *International Scientific Conference „Ductile Iron of the 21st Century”*, Foundry Research Institute Kraków, 1/29.
- [21] Pietrowski S., 1997. Żeliwo sferoidalne o strukturze ferrytu bainitycznego z austenitem lub bainitycznej. *Archiwum Nauki o Materiałach* 18 (4), 253.
- [22] Podrzucki C., 1991. Żeliwo. Struktura, własności, zastosowanie. T.1-2, Wyd. ZG STOP Kraków.
- [23] Podrzucki C., Wojtysiak A., 1987. Żeliwo plastyczne niestopowe. Skrypt AGH nr 1095 (cz. I), Kraków.
- [24] Tuszyński A., Wodnicki J., 2000. Wytwarzanie żeliwa ADI w Instytucie Odlewnictwa. Prototypowa linia technologiczna LT ADI – 350/1000 do obróbki cieplnej – cz. I. *International Scientific Conference „ADI – Foundry’s offer for designers and users of castings”*, Foundry Research Institute Kraków, 1/19.
- [25] Tybulczuk J., Kowalski A., 2003. Żeliwo ADI. Własności i zastosowanie w przemyśle. *Atlas odlewów*. Instytut Odlewnictwa Kraków, 78.
- [26] Yescas M.A., Bhadeshia H.K.D.H., 2002. Model for the maximum fraction of retained austenite in austempered ductile cast iron. *Materials Science and Engineering A333*, 2002, 60.
- [27] Yescas M.A., Bhadeshia H.K.D.H., Mackay D.J., 2002. Estimation of the amount of retained austenite in austempered ductile irons using neural networks. *Materials Science and Engineering A 311*, 162.

[28] Zanardi F., 2004. Wytrzymałość zmęczeniowa i obrabialność ADI. II Międzynarodowa Konferencja i Wystawa – Nowe Kierunki Rozwoju w Metalurgii, Riva del Garda.

[29] www.appliedprocess.com.

Recenzował: Prof. dr hab. Edward Guzik

SELECTED ASPECTS OF THE RESEARCH ON ADI

Summary

The paper presents the selected problems related to production of Austempered Ductile Iron (ADI). Selection of parameters of heat treatment allows to shapping the microstructure and properties. On the quality of ADI influences the metallurgical treatment beside heat treatment.