

*żeliwo ciągliwe białe, cementyt eutektyczny,
wyżarzanie grafityzujące, struktura perlityczna, ferryt,
węgiel żarzenia, warstwy odwęglone, niepełny cykl wyżarzania*

Bogumił PATEREK¹

PROBLEMATYKA ELIMINACJI CEMENTYTU EUTEKTYCZNEGO ZE STRUKTURY ŻELIWA BIAŁEGO W PROCESIE WYŻARZANIA

W artykule przedstawiono problematykę wykorzystania właściwości perlitycznych warstw w odlewach z żeliwa ciągliwego białego po niepełnym cyklu wyżarzania. Wskazano możliwości zastosowania tych obszarów po zabiegach hartowania i azotowania w warunkach intensywnego zużycia ściernego. Zwiększenie odporności na ścieranie odlewów jest uzupełnieniem bardzo dobrych właściwości tego materiału konstrukcyjnego w zakresie wytrzymałości na rozciąganie, plastyczności, udatności i spawalności. Podstawowym aspektem w procesie niepełnego wyżarzania jest określenie wpływu istotnych czynników decydujących o czasie rozpuszczania się cementytu eutektycznego w austenicie w czasie I stadium grafityzacji.

THE ISSUE OF ELIMINATION OF EUTECTIC CEMENTITE OUT OF THE STRUCTURE OF WHITE CAST IRON IN THE ANNEALING PROCESS

The article presents the issue of the use of the properties of pearlitic structure malleable white cast iron GTW after incomplete annealing cycle. Indicated possibility application this case after induction hardening and nitriding treatment in intensive abrasive wear. Improvement of wear resistance of castings is the complement to very good properties of the material of construction for the tensile strength, ductility, toughness and weldability. An essential aspect in the incomplete annealing process is to determine the impact of important factors determining on the time of dissolution of the eutectic cementite in austenite during the I stage of graphitization.

1. WSTĘP

Żeliwo ciągliwe znajduje szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu m in.: w budownictwie, górnictwie, przemyśle kolejowym głównie jako części maszyn transportowych i technologicznych oraz elementy instalacji hydraulicznych. W ostatnim okresie pojawiają się problemy w produkcji odlewów ze względu na ogólnopolski kryzys gospodarczy w zakresie technik wytwarzania. Jak wynika ze statystyki, produkcja odlewów

¹Wydział Mechaniczny, Politechnika Radomska im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, ul. Kraciskiego 54, tel. (48) 361 76 35, e-mail: bogumilpaterек@poczta.fm

w kraju w przeciwieństwie do krajów wysoko rozwiniętych zmniejszyła się 4-krotnie w stosunku do lat 80-tych [1,7]. Istotne znaczenie ma tutaj jednak wysoki eksport wyrobów z żeliwa ciągliwego, stanowiący ok. 30 % ogólnej produkcji odlewów z tego tworzywa, co świadczy o dużych walorach eksploatacyjnych docenianych w innych krajach [1].

Mimo bardzo dobrych właściwości plastycznych, wytrzymałościowych i użytkowych to tworzywo konstrukcyjne jest mało doceniane. Wydaje się, że nie wykorzystuje się zwłaszcza dużych możliwości w zakresie zastosowania odwęglonych warstw perlitycznych w warunkach intensywnego zużycia eksploatacyjnego. Zwiększenie odporności na ścieranie warstw wierzchnich odlewów z żeliwa ciągliwego białego (po zdjęciu warstwy ferrytycznej) w połączeniu z bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi, daje dużą uniwersalność i zwiększa możliwości jego zastosowania. Innym kierunkiem badań jest wykorzystanie nierozpuszczonego cementytu eutektycznego w tworzeniu warstw o zwiększonej odporności na ścieranie.

Żeliwo ciągliwe zostało częściowo wyparte przez żeliwo sferoidalne w budowie maszyn, co nie zawsze ma uzasadnienie ekonomiczne. Połączenie dobrych właściwości plastycznych, wytrzymałościowych i trybologicznych będzie bardziej efektywne w odlewach z żeliwa ciągliwego białego niż w odlewach z żeliwa sferoidalnego. W tym zakresie przeprowadzono wstępne badania w Instytucie Budowy Maszyn Politechniki Radomskiej.

2. METODYKA BADAŃ

Zakres badań obejmował:

- określenie wpływu zawartości węgla, krzemu, manganu, siarki i warunków metalurgicznych na czas eliminacji cementytu ze struktury żeliwa w I stadium grafityzacji,
- azotowanie warstw odwęglanych w cyklu żarzenia żeliwa białego,
- analiza metalograficzna próbek.

Badania prowadzono na próbkach z 16 wytopów, zrealizowanych według macierzy planowania doświadczeń ekstremalnych 2^{6-2} [2], przy założeniu 6 zmiennych na następujących poziomach:

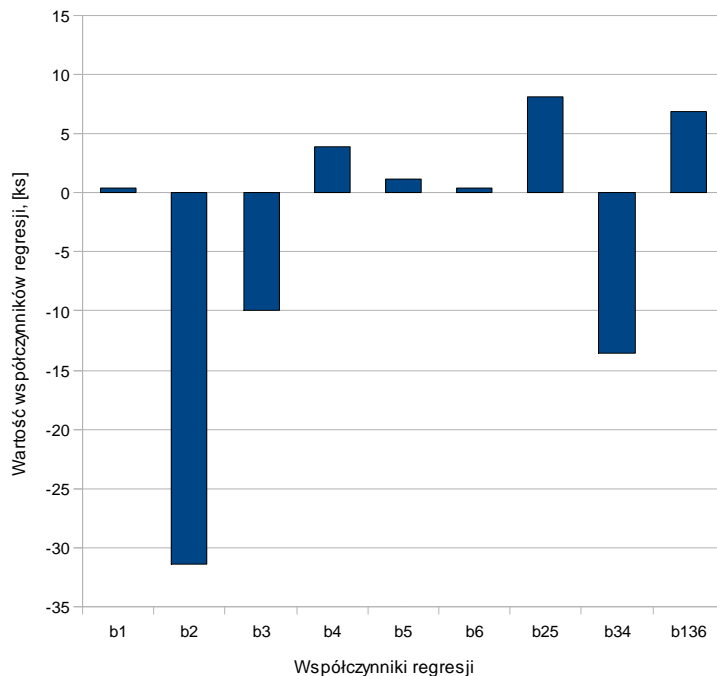
- | | |
|--------------------------------------------|--------------------|
| – węgiel: | 2.30% i 3.30% ; |
| – krzem: | 0.40% i 1.10% ; |
| – mangan: | 0.20% i 0.60% ; |
| – siarka: | 0.05% i 0.25% ; |
| – temperatura zalewania formy: | 1400 °C i 1450 °C |
| – temperatura przegrzania ciekłego żeliwa: | 1480 °C i 1550 °C. |

Odlane próbki krzepły w układzie metastabilnym, a więc posiadały strukturę perlityczną z wydzieleniami cementytu eutektycznego. Wyżarzanie grafityzujące prowadzono w temperaturze 950 °C w czasie od 1 do 40 godzin. Tak zróżnicowany czas podyktowany był przesłankami z analizy literatury dotyczącej badań nad trwałością cementytu w I stadium grafityzacji [3,4,5]. Kinetyka rozpuszczania cementytu w austenicie zależy od wielu czynników i ich efektów współdziałania (np. indywidualne oddziaływanie manganu i siarki może się wzajemnie neutralizować przez wiązanie się w siarczki). Wpływ tych czynników określano za pomocą uzyskanych współczynników regresji w macierzy planowania

doświadczeń ekstremalnych 2^{6-2} , dzięki którym zminimalizowano ilość niezbędnych badań zamykających się w 16 zróżnicowanych wytopach żeliwa wlewanego do form skorupowych i metalowych. W badaniach tych uwzględniono również procesy modyfikacji skracającej skuteczny czas eliminacji cementytu eutektycznego ze struktury żeliwa białego w procesie wyżarzania. W praktyce proces ten prowadzony jest do momentu rozpuszczenia wydzieleni cementytu, ponieważ wynikało to z potrzeb odpowiednich właściwości użytkowych lub technologicznych. Powstało pytanie czy nie warto wykorzystać właściwości żeliwa ciągliwego białego z pewną ilością nierozłożonego cementytu eutektycznego, poprawiającego zdecydowanie odporność na ścieranie przy zachowaniu dobrych właściwości wytrzymałościowych, plastycznych i spawalnych. Strukturę warstw uzyskanych w żelwie ciągliwym białym przedstawiono na rysunku 5a. Istotnym problemem w uzyskaniu odpowiedniej grubości tych warstw jest znajomość czasu rozpuszczania cementytu eutektycznego w austenicie oraz kinetyki dyfuzji węgla ze struktury decydującej o odwęgleniu. Na te procesy istotnie oddziałują założone w badaniach zmienne parametry (C, Si, Mn, S, T_{zal} , T_p), ich efekty współdziałania, szybkość krystalizacji oraz zabiegi modyfikacji ciekłego stopu. Jak wynika z analizy literatury i praktyki przemysłowej, nie prowadzono kompleksowych badań nad wykorzystaniem korzystnych cech warstw perlitycznych położonych za warstwą odwęgloną w żelwie ciągliwym białym w zakresie intensywności zużycia trybologicznego (Rys. 5). Struktura ta charakteryzuje się dużą podatnością do hartowania i azotowania [4], przez co istnieje możliwość zwiększenia odporności na ścieranie tych fragmentów odlewów, które pracują w warunkach dużej intensywności zużycia. Zwiększenie odporności na ścieranie tej warstwy można dodatkowo uzyskać przez udział w strukturze nierozłożonego cementytu eutektycznego, zatem celem jest stosowanie niepełnych cykli żarzenia. Badania intensywności zużycia próbek realizowano metodą trójwałeczkową zgodnie z PN 83/H-04302, natomiast czas ich azotowania gazowego wynosił 20 godzin w temperaturze 550 °C. Badania metalograficzne wytrawionych próbek prowadzono na mikroskopie Nephot 21 przy powiększeniach $\times 100$ i $\times 400$ (Rys. 2, 4, 5).

3. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Badania trwałości cementytu eutektycznego w I stadium grafityzacji wykazały, istotność oddziaływania założonych zmiennych i ich efektów współdziałania zgodnie z wykresem przedstawionym na Rys. 1.

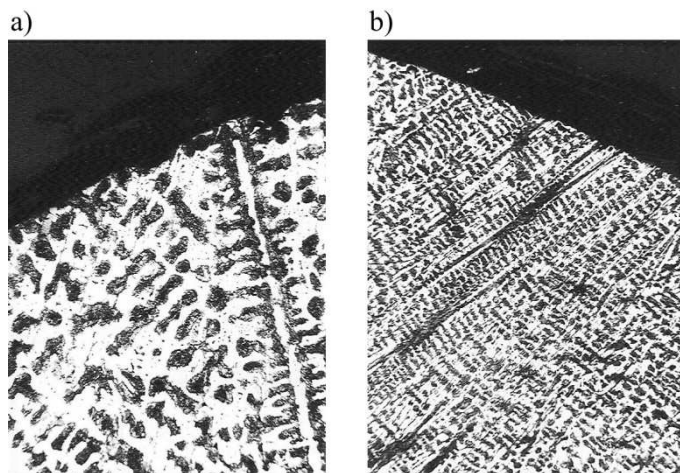


Rys. 1. Porównanie współczynników regresji parametrów zmiennych i ich efektów współdziałania w badaniach skutecznego czasu eliminacji cementytu eutektycznego w I stadium grafityzacji

Z porównania współczynników regresji wynika, że krzem (b_2) zdecydowanie skraca czas rozpuszczania cementytu eutektycznego. W przypadku zastosowanie krzemu na poziomie wyższym (1.1 %) zmniejsza się skuteczny czas wyżarzania o ok. 30 ks od wartości średniej dla wszystkich wytopów, wynoszącej 51 ks. Duże znaczenie wykazuje również mangan ($b_3 = -10$ ks), którego oddziaływanie należy rozpatrywać w połączeniu z zawartością siarki o czym świadczy wysoka wartość efektu współdziałania $b_{34} = -14$ ks. Mangan wchodzi w reakcję z siarką tworząc związek chemiczny w postaci siarczków. Istotna jest zatem wzajemna proporcja tych pierwiastków, która ma znaczenie przy określaniu ich wpływu na czas rozpuszczania cementytu eutektycznego w I stadium grafityzacji. W przypadku zastosowania manganu i siarki na poziomie wyższym uzyskuje się większy efekt skrócenia czasu rozpuszczania cementytu eutektycznego. Takie oddziaływanie ma swoje uzasadnienie literaturowe, tłumaczone wpływem wydzielen siarczkowych na kinetykę zarodkowania węgla żarzenia. W przypadku zastosowania wysokiej zawartości siarki (0.25 %) i niskiej zawartości manganu (0.2 %), uzyskuje się niekorzystny sumaryczny efekt w postaci wydłużenia cyklu skutecznego wyżarzania o 28 ks (suma wartości współczynników regresji wynosi: $b_3 + b_4 + b_{34} = 10 + 4 + 14 = 28$ ks).

Skrócenie czasu rozpuszczania cementytu eutektycznego można uzyskać stosując intensywniejsze krzepnięcie odlewów np. w formach kokilowych. Niestety w tym

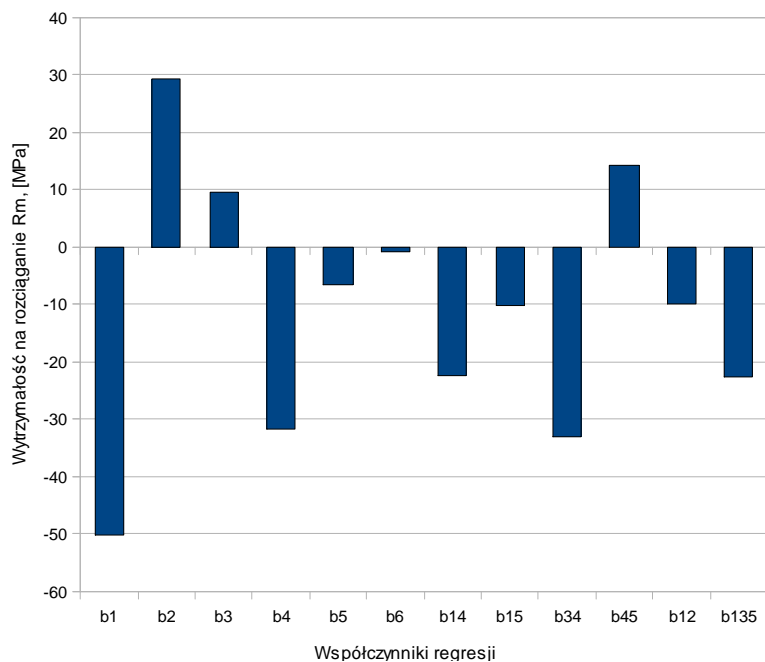
przypadku istnieją bariery technologiczno- konstrukcyjne dla skomplikowanych kształtów odlewów, które charakteryzują się dużą skłonnością do pęknięć. Na rysunku 2 przedstawiono różnice w rozdrobnieniu struktury przy zróżnicowanej szybkości krystalizacji odlewów.



Rys. 2. Porównanie rozdrobnienia struktury żeliwa białego po zróżnicowanej intensywności krystalizacji odlewów; a- po krzepnięciu w formie skorupowej, b- po krzepnięciu w formie metalowej, pow. $\times 100$

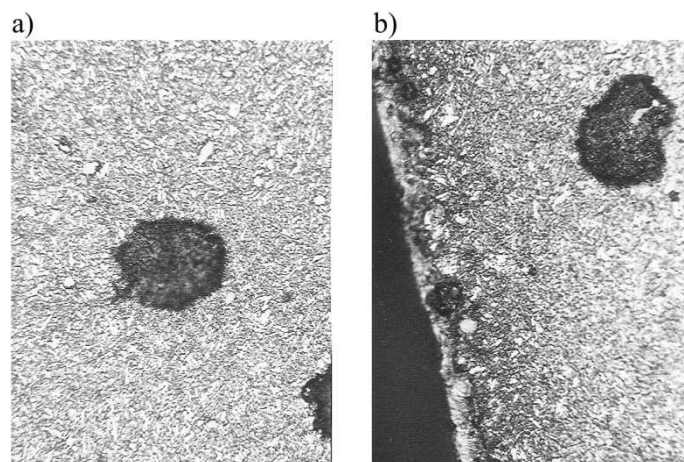
Ważnym aspektem w procesie kształtowania właściwości odlewów z żeliwa ciągliwego o osnowie perlitycznej jest określenie wpływu założonych zmiennych parametrów i ich efektów współdziałania na wytrzymałość na rozciąganie R_m . Na rysunku 3 porównano ich oddziaływanie przez analizę uzyskanych wartości współczynników regresji. Największy wpływ wykazuje tutaj węgiel (b_1), który przy zastosowaniu na wyższym poziomie (3.3 %) daje efekt zmniejszenia wytrzymałości na rozciąganie o ok. 50 MPa od wartości średniej dla 16 wytopów wynoszącej 511 MPa.

Mangan i krzem oddziałują dodatnio na wytrzymałość na rozciąganie natomiast siarka ujemnie. Analiza jednoczesnego wpływu siarki (b_4) i manganu (b_3) oraz siarczków (b_{34}) wskazuje na uzyskanie największego synergizmu w przypadku żeliwa zawierającego niską zawartość siarki (0.05 %) i wyższą zawartość manganu (0.6 %) przy małej ilości siarczków ($b_3 + b_4 + b_{34} = 10 + 32 + 33 = 75$ MPa). Pozostałe efekty współdziałania nie są również bez znaczenia, co świadczy o złożoności procesu kształtowania właściwości wytrzymałościowych żeliwa ciągliwego o osnowie perlitycznej.



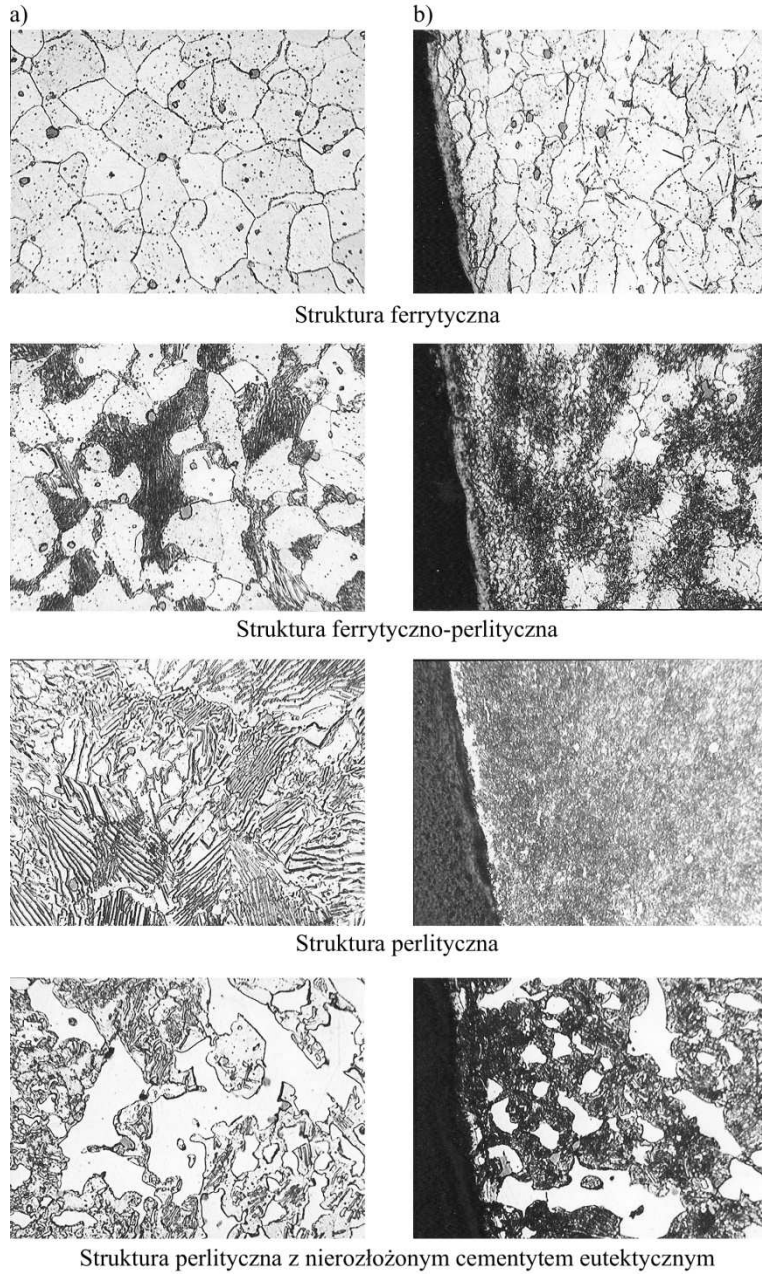
Rys. 3. Porównanie współczynników regresji dla 6 zmiennych niezależnych i ich efektów współdziałania w badaniach wytrzymałości na rozciąganie żeliwa ciągliwego o osnowie perlitycznej

Zgodnie z przesłankami teoretycznymi z innymi badaniami [3,4,5], w niektórych wytopach uzyskano węgiel zarzenia o kształcie sferoidalnym (Rys. 4). Istotne znaczenie ma tutaj oddziaływanie zwiększonej ilości siarki w stosunku do zawartości manganu. Dzięki temu zjawisku można polepszyć wytrzymałość na rozciąganie żeliwa ciągliwego.



Rys. 4. Kształt wydzieliń węgla żarzenia w żeliwie ciągliwym o osnowie perlitycznej (0.25 % S; 0.2 % Mn): a - warstwy hartowane nieazotowane, b - warstwy hartowane i azotowane

Badania metalograficzne zastosowano głównie w celu zobrazowania zmian w wyniku azotowania wszystkich warstw jakie uzyskuje się w procesie wyżarzania odwęglającego żeliwa białego w temperaturze 1020 °C, realizowanego w piecu Birlec. Na rysunku 5. przedstawiono fotografie zglądów wybranych próbek żeliwnych. Na uwagę zasługuje fakt wyraźnej destrukcji płytkowej budowy perlitu po procesie azotowania, zarówno w strukturze ferrytyczno- perlitycznej jak i w perlitycznej. Uzyskane informacje co do głębokości wnikania i reakcji azotu oraz rodzaju uzyskanych azotków, są niezbędne w opracowaniu technologii zwiększania odporności na ścieranie warstw perlitycznych żeliwa ciągliwego białego.

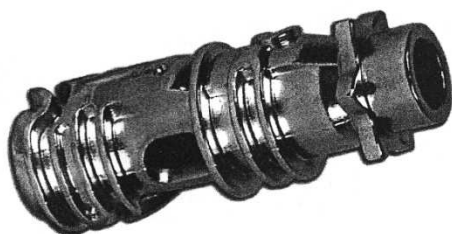


Rys.5. Zmiany strukturalne po procesie azotowania warstw odlewu z żeliwa ciągłego o niepełnym cyklu wyżarzania odwęglającego: a - obszary bez azotowania, b - warstwy po hartowaniu i azotowaniu, powiększenie $\times 400$

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki badań po pewnych uzupełnieniach można wykorzystać w praktyce przemysłowej. Duże nadzieje wiązać należy z ostatnimi tendencjami rozwoju małych firm odlewniczych w kraju, które wytwarzają eksportowe odlewy do maszyn technologicznych i transportowych. Zatem dokładna analiza właściwości odlewniczych materiałów konstrukcyjnych ma swoje uzasadnienie zwłaszcza w stosowaniu zamienników różnych wyrobów stalowych. Bardzo trafnie przekonują o tym autorzy artykułu „Odlew roku - czyli jak to się robi w Ameryce...” [6]. Przedstawiono tam m.in. nagrodzony precyzyjny odlew stalowy krzywki jako zamiennik złożonej części stalowej producenta Signicast Investment Castings (Rys. 7a). Analiza żeliwa ciągliwego białego jako zamiennika materiału konstrukcyjnego w tym przypadku, wydaje się dać bardzo obiecujące efekty. Miejsca narażone na intensywne zużycie należy wykonać tak, by usunąć warstwę ferrytu, pozostawiając perlit z wydzieleniami nierozłożonego cementytu i poddać azotowaniu o ile będzie wskazana duża twardość warstwy wierzchniej. Innym wyróżnionym stalowym odlewem o wadze 94 kg było ramię retardera spełniającego funkcję zwalnicza kłapy 10-tonowej górniczej koparki (Rys.7b). W tym przypadku wydaje się, że odlew jest zbyt "skupiony" przez co charakteryzuje się niewłaściwym wskaźnikiem wytrzymałości postaciowej. Przy polepszeniu wskaźnika wytrzymałości przez zwiększenie powierzchni odlewu i gabarytów zewnętrznych ramienia oraz zmniejszenie grubości ścianki, można zdecydowanie zaoszczędzić ilość materiału konstrukcyjnego. Zmniejszenie grubości ścianki w tym odlewie jest bardzo wskazane w przypadku zastosowania żeliwa ciągliwego białego, ponieważ daje to lepszą udarność wymaganą w tego rodzaju warunkach pracy.

a)



b)



Rys. 6. Przykłady odlewów nagrodzonych w konkursie *Casting of the Year*:
a - odlew krzywki, b - odlew ramienia retardera [6]

Podobnych przykładów zastosowania żeliwa ciągliwego białego z pełnym i niepełnym cyklem żarzenia w budowie maszyn można znaleźć wiele. Rozwój praktycznego zastosowania zwłaszcza koncepcji wykorzystania niepełnego cyklu żarzenia daje szansę zwiększenia popularności żeliwa ciągliwego białego jako uniwersalnego materiału konstrukcyjnego zarówno pod względem korzystnych właściwości wytrzymałościowych, plastycznych, udarowościowych a szczególnie trybologicznych i walorów ekonomicznych. Badania w tym zakresie kontynuowane są w Instytucie Budowy Maszyn Politechniki Radomskiej we współpracy z Fabryką Łączników S.A. w Radomiu. Analiza powyższych

aspektów i uzyskanych wyników badań, pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Specyfika budowy ścianki odlewu z żeliwa ciągliwego białego daje możliwości wykorzystania warstw perlitycznych, po uprzednim usunięciu warstwy z udziałem ferrytu, do eksploatacji w warunkach intensywnego zużycia tarcowego. Zwiększenie odporności na ścieranie można tutaj polepszyć metodą hartowania powierzchniowego.
2. Istnieją przesłanki teoretyczne i praktyczne co do celowości prowadzenia dalszych badań nad wykorzystaniem niepełnego cyklu żarzenia odlewów z żeliwa ciągliwego białego. Uzyskany materiał konstrukcyjny, po zdjęciu warstwy z udziałem ferrytu charakteryzuje się małą intensywnością zużycia trybologicznego dzięki obecności w perlicie nierozłożonego cementytu eutektycznego. Pozostałe obszary odlewu z udziałem warstwy odwęglonej gwarantują dobre właściwości wytrzymałościowe i udarność, co ma istotne znaczenie w warunkach pracy dynamicznej elementów maszyn.
3. Badania wykazały, że po usunięciu ferrytycznej warstwy odwęglonej, obszary głębiej położone z udziałem perlitu w większości wytopów bardzo dobrze się azotują. Daje to gwarancję poprawy odporności na ścieranie z jednoczesnym wykorzystaniem indukcyjnego procesu hartowania powierzchniowego.
4. Analiza możliwości wykorzystania żeliwa ciągliwego białego w budowie maszyn jako optymalnego materiału konstrukcyjnego posiadającego również wysokie walory w zakresie dużej trwałości eksploatacyjnej w warunkach intensywnego zużycia tarcowego, daje dużą nadzieję na jego wykorzystanie jako zamiennika stali i żeliwa sferoidalnego w praktyce przemysłowej.

Stosowanie żeliwa ciągliwego białego z niepełnym cyklem żarzenia wymaga znajomości kinetyki rozpuszczania cementytu eutektycznego w I stadium grafityzacji oraz dyfuzji węgla z warstw przypowierzchniowych odlewów. Intensywność przebiegu tych procesów zależy od składu chemicznego żeliwa, szybkości krystalizacji odlewów, warunków metalurgicznych oraz zabiegów modyfikacji w stanie ciekłym.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Baryła I., Lewandowski K.: *Żeliwo ciągliwe jako tworzywo na odpowiedzialne elementy instalacji i urządzeń przemysłowych*, Przegląd Odlewnictwa nr 10-11, Kraków 2004.
- [2] Nalimow W., Czernowa N.: *Statystyczne metody planowania doświadczeń ekstremalnych*, WNT Warszawa, 1971.
- [3] Paterek B.: *Badanie czynników intensyfikujących proces wyżarzania grafityzującego żeliwa białego*, praca doktorska, AGH Kraków 1991.
- [4] Paterek B.: *Intensyfikacja efektu obróbki cieplno-chemicznej żeliwa ciągliwego przez kompleksową modyfikację ciekłego stopu*, praca badawcza, Politechnika Radomska, 2006.
- [5] Podrzucki Cz., Wojtysiak A.: *Żeliwo plastyczne niestopowe*, skrypt uczelniany AGH nr 1138 cz. II, Kraków 1988.
- [6] Reguła T., Darlak P., Saja K.: *Odlew roku- czyli jak się to robi w Ameryce...*, Przegląd Odlewnictwa nr 7-8, Kraków 2009.
- [7] Roczniki Statystyczne dot. przemysłu odlewniczego.
- [8] Stręć F.: *Rozwój odlewnictwa w latach 1936- 1986*, Przegląd Odlewnictwa nr 10-11, Kraków 2010.