

Wytapianie żeliwa szarego i sferoidalnego bez surówki

K. Janerka*, J. Jezierski, J. Szajnar, D. Bartocha

Katedra Odlewnictwa, Politechnika Śląska, ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: krzysztof.janerka@polsl.pl

Otrzymano 16.04.2012; zaakceptowano do druku 02.07.2012

Streszczenie

Przedstawione w artykule zagadnienia w sposób pośredni, ale bardzo znaczący dotyczą problematyki ochrony środowiska. Obejmują one tematykę wytwarzania żeliwa szarego i sferoidalnego wyłącznie na bazie złomu stalowego. Eliminacja lub ograniczenie surówki we wsadzie to korzyści zarówno ekonomiczne jak i ekologiczne. W artykule omówiono podstawowe zagadnienia związane z metodą prowadzenia procesu nawęglania w piecach elektrycznych. Przedstawiono jak wpływa rodzaj materiału nawęglającego na skład chemiczny, strukturę i własności wytopionego żeliwa. Wskazano również czynniki ograniczające produkcję żeliwa sferoidalnego na bazie złomu stalowego.

Słowa kluczowe: żeliwo szare, żeliwo sferoidalne, nawęglanie stopów żelaza, efektywność nawęglania, struktura żeliwa

1. Wprowadzenie

Wytapianie żeliwa szarego na bazie złomu stalowego (bez udziału surówki we wsadzie) było przedmiotem wielu publikacji [1,2,3]. Znacznie mniej informacji można znaleźć na temat wytapiania żeliwa sferoidalnego na bazie złomu stalowego. Wynika to z faktu, że żeliwo sferoidalne posiada znacznie więcej ograniczeń, które dotyczą mniejszej ilości zanieczyszczeń (S i P), większej zawartości węgla w stopie, oraz mniejszej zawartości niektórych pierwiastków (Mn). Wiele odlewni ogranicza stosowanie złomu stalowego do produkcji żeliwa sferoidalnego z obawy o pogorszenie jego własności mechanicznych oraz struktury. Wiele tych obaw jest efektem stereotypowego myślenia, że najlepsza jest surówka. Nie ulega wątpliwości, że prowadzenie wytopu na bazie surówki jest najprostsze. Nie podlega również dyskusji, że najpewniejszym sposobem otrzymywania żeliwa sferoidalnego ferrytycznego jest zastosowanie surówki specjalnej. Ale na tym ograniczenia się kończą. Biorąc pod uwagę dysproporcje cenowe złomu i surówki z całą pewnością jego zastosowanie pozwala na uzyskanie oszczędności w kosztach materiałów wsadowych. Zastosowanie złomu stalowego ma również wymiar ekologiczny [4].

Wylimitowanie surówki wiąże się z koniecznością nawęglania metalu. Dlatego należy dokonać dobrego wyboru metody nawęglania i rodzaju materiału nawęglającego. Od tego

zależy, czy proces nawęglania będzie traktowany jako integralny fragment procesu topienia czy może jako zło konieczne.

2. Materiały wsadowe

W trakcie realizacji badań wykonano kilkadziesiąt wytopów żeliwa szarego oraz 12 wytopów żeliwa sferoidalnego na bazie złomu stalowego o różnym składzie chemicznym. Wytopy prowadzono wyłącznie na bazie złomu stalowego i nawęglaczy. Dla porównania wykonano wytopy na bazie surówki specjalnej (żeliwo sferoidalne) i odlewniczej (żeliwo szare). Materiały nawęglające były wprowadzane do pieca do stałego wsadu w obliczonych i odważonych wcześniej porcjach. Masa złomu stalowego wynosiła od 10 do 15 kg. We wszystkich wytopach uzupełniono zawartość krzemu dodając FeSi75 na powierzchnię ciekłego metalu po roztopieniu wsadu. Wytopy realizowano w piecu indukcyjnym tyglowym wysokiej częstotliwości o pojemności 20 kg. Proces sferoidyzacji przeprowadzono w piecu topialnym metodą wprowadzania (ręcznego) drutu rdzeniowego. Po sferoidyzacji przeprowadzono w kadzi proces modyfikacji.

W badaniach w procesie wytapiania żeliwa zastosowano surówkę odlewniczą S1 oraz specjalną SP, których skład chemiczny przedstawiono w tabeli 1 oraz złom stalowy o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 2.

Tabela 1.

Skład chemiczny surówki zastosowanej w wytopie S1

| Lp. | C | Si | Mn | P | S | Cu |
|-----|------|------|------|-------|-------|-------|
| | % | % | % | % | % | % |
| S1 | 4,3 | 2,20 | 0,70 | 0,080 | 0,040 | 0,085 |
| SP | 4,41 | 0,72 | 0,05 | 0,048 | 0,015 | 0,011 |

Tabela 2.

Skład chemiczny złomu stalowego zastosowanego w wytopach

| Lp. | C | Si | Mn | P | S | Ni | Cu |
|-----|------|------|------|-------|-------|------|------|
| | % | % | % | % | % | % | % |
| Z1 | 0,21 | 0,18 | 0,60 | 0,026 | 0,015 | 0,12 | 0,28 |
| Z2 | 0,05 | 0,35 | 1,22 | 0,010 | 0,003 | 0,99 | 0,03 |
| Z3 | 0,08 | 0,12 | 0,48 | 0,006 | 0,005 | 0,01 | 0,12 |
| Z4 | 0,04 | 0,14 | 0,49 | 0,009 | 0,013 | 0,10 | 0,34 |
| Z5 | 0,32 | 0,38 | 0,85 | 0,006 | 0,002 | 0,15 | 0,29 |
| Z6 | 0,03 | 0,09 | 0,30 | 0,040 | 0,005 | 0,01 | 0,02 |

Analizując skład złomu stalowego i surówki można zauważyć oczywistą różnicę w zawartości węgla i krzemu w złomie i surówce. Istotnym problemem ograniczającym zakres wytapanego żeliwa sferoidalnego jest zawartość manganu. Stosując przedstawiony w tabeli 2 złom stalowy będzie można uzyskać strukturę ferrytyczną lub ferrytyczno-perlityczną tylko w wytopie z zastosowaniem złomu Z6. Jest to złom stalowy pozyskany z blach karoseryjnych ocynkowanych i lakierowanych. W pozostałych przypadkach struktura może być perlityczno-ferrytyczna (z różnym udziałem ferrytu) lub perlityczna. Można już tutaj zauważyć, że wytop żeliwa GJS-400-15 ze złomu stalowego będzie bardzo utrudniony z powodu wysokiej zawartości manganu we wsadzie. Zawartość siarki i fosforu w złomie stalowym jest w większości przypadków nawet niższa niż w surówce specjalnej. Oznacza to, że złom stalowy posiada znacznie mniej zanieczyszczeń niż surówka i nie będzie on powodem wzrostu zawartości tych pierwiastków w żeliwie. Może być natomiast powodem wzrostu zawartości miedzi w stopie. Chociaż w większości przypadków wytopu żeliwa szarego miedź jest wprowadzana dodatkowo w celu utrwalenia perlitu.

Do nawęglania kąpieli metalowej w procesie wytapania żeliwa zastosowano antracyt kalcynowany (A), grafit naturalny (GN) i syntetyczny (GS) oraz koks naftowy kalcynowany (KN), koks odlewniczy (KO) i węgiel drzewny (WD) [1,2]. Ich skład chemiczny przedstawiono w tabeli 3.

Zastosowane w badaniach materiały nawęglające posiadały wysoką zawartość węgla (powyżej 94%) i niską zawartość siarki. Oznacza to, że w żeliwie sferoidalnym przy stosowaniu wysokiej jakości nawęglaczy nie powinien nastąpić wzrost zawartości siarki w stopie. Przy produkcji żeliwa sferoidalnego wzrost zawartości siarki w ciekłym metalu powoduje konieczność zwiększenia ilości zaprawy sferoidyzującej, a w konsekwencji zwiększenie kosztów wytopu. Zawartość siarki w nawęglaczach może wynosić od 0,01-0,80% w zależności od jego rodzaju. W przeprowadzonych wytopach zawartość siarki wynosiła 0,015 – 0,047% a zawartość fosforu 0,018 – 0,052%. W przeważającej części wytopów wykonanych na bazie złomu stalowego zawartość tych zanieczyszczeń była niższa niż w żeliwie uzyskanym na bazie surówki.

Tabela 3.

Skład chemiczny nawęglaczy stosowanych w badaniach

| Rodzaj nawęglacza | Skład chemiczny | | | | | | |
|-------------------|-----------------|-------|--------------|------------|-------|-------|------|
| | C [%] | S [%] | Cz. lot. [%] | Popiół [%] | N [%] | H [%] | |
| GN | 85,0 | 0,08 | 3,0 | 11,0 | 0,10 | 0,41 | |
| A | min | 92,0 | 0,1 | 0,7 | 3,5 | 0,36 | 0,27 |
| | max | 96,0 | 0,2 | 1,0 | 8,0 | 0,46 | 0,53 |
| GS | min | 99,0 | 0,01 | 0,1 | 0,2 | 0 | 0,28 |
| | max | 99,7 | 0,04 | 0,3 | 0,9 | 0,01 | 0,32 |
| KN | min | 98,0 | 0,03 | 0,20 | 0,26 | 0,68 | 0,39 |
| | max | 99,7 | 0,80 | 1,0 | 0,9 | 1,98 | 0,46 |
| KO | 88 | 0,80 | 1,4 | 10,5 | - | - | |
| WD | 83 | 0,0 | 13,3 | 2,1 | - | - | |

Materiały nawęglające mogą zawierać od 0,2-11% popiołu (grafity naturalne), który może opóźnić wymianę masy w procesie nawęglania i powodować powstawanie większej ilości żużla. Kolejny pierwiastek, który należy uwzględnić w badaniach materiałów nawęglających to azot. W grafitach syntetycznych jego zawartość jest praktycznie poniżej zakresu wskazań aparatów pomiarowych. W antracytach zawartość azotu wynosi ok. 0,1-0,4%, a w kokсах naftowych może się zmieniać w bardzo szerokim zakresie 0,01 – 1,98%. Zawartość wodoru w nawęglaczach jest najniższa w grafitach syntetycznych (ok. 0,2%), a w pozostałych materiałach nawęglających waha się od 0,25-0,5%. Zakres zmienności zawartości tego pierwiastka jest we wszystkich rodzajach nawęglaczy stosunkowo niewielki.

Zawartość gazów w wytapianym żeliwie szarym przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4.

Zawartość wodoru, azotu i tlenu w wytopionym żeliwie szarym na bazie surówki i na bazie złomu stalowego

| Nr wytopu | H | N | O |
|-----------|-----|-----|-----|
| | ppm | ppm | ppm |
| A2 | 2,5 | 83 | 91 |
| GN | 1,7 | 66 | 35 |
| GS2 | 2,2 | 63 | 39 |
| GS4 | 2,1 | 66 | 40 |
| KN3 | 2,9 | 63 | 79 |
| KN4 | 2,4 | 106 | 55 |
| KN5 | 1,8 | 83 | 37 |
| S1_Sz | 1,8 | 51 | 45 |
| S2_Sz | 2,2 | 38 | 66 |

Analizując uzyskane wyniki pomiarów i odnosząc je do zawartości analizowanych pierwiastków w żeliwie wytopionym na bazie surówki (S1_Sz i S2_Sz) można stwierdzić, że zawartość wodoru jest wyższa w żeliwie nawęglanym koksem naftowym KN3. Zawartość azotu jest najwyższa w żeliwie nawęglanym koksem naftowym KN4. Zawartość tlenu jest wyraźnie wyższa w żeliwie nawęglanym antracytem i koksem naftowym KN3.

Analizując skład chemiczny materiałów nawęglających oraz uzyskanego żeliwa można zauważyć, że najlepszymi materiałami nawęglającymi są grafity syntetyczne. Posiadają one wysoką zawartość węgla (powyżej 99%), niską zawartość siarki i popiołu oraz niską zawartość azotu, tlenu i fosforu.

Można również zauważyć, że tylko zawartość azotu w żeliwie wytopionym na bazie surówki jest niższa niż w żeliwie syntetycznym. Zawartość wodoru i tlenu jest niższa w żeliwie nawęglanym grafitami syntetycznymi i koksem naftowym KN5.

3. Metody nawęglania

Analizując metody nawęglania stopów żelaza w piecach elektrycznych można wyróżnić wprowadzanie nawęglacza do stałego wsadu, dodawanie na powierzchnię roztopionego metalu w piecu lub wprowadzanie w strumieniu gazu nośnego (w piecach łukowych) [5,6,7].

Wprowadzanie nawęglacza ze stałym wsadem metalowym może być stosowane zarówno w piecach elektrycznych indukcyjnych, jak i łukowych. Metoda ta nie wymaga dodatkowych urządzeń do dozowania nawęglacza, a stopień przyswojenia węgla przez ciekły metal może wynosić 70-96%, w zależności od zastosowanego pieca i rodzaju nawęglacza. Stanowi ona zazwyczaj pierwszy etap procesu nawęglania. Wynika to z faktu, że załadunek pieców odbywa się najczęściej dwuetapowo. Najpierw topi się zawartość pierwszego kosza wsadowego, a następnie doładowuje się piec do żądanej masy metalu. Oznacza to, że w ten sposób można wprowadzić tylko część zakładanej porcji nawęglacza. Nie zapewnia ona oczekiwanej zawartości węgla, jaką chcemy uzyskać na koniec procesu. Wymusza to korektę węgla przez kolejne nawęglanie inną metodą (narzucanie na powierzchnię).

Uzyskanie wysokiego stopnia przyswojenia w tej metodzie jest możliwe dla każdego materiału nawęglającego. Należy jednak uwzględnić, że materiały niegrafitowe (szczególnie antracyt) rozpuszczają się wolniej. Dla zwiększenia efektywności należy w ich przypadku wydłużyć czas nawęglania i podwyższyć temperaturę ciekłego metalu. O wyborze określonego nawęglacza w tej metodzie będzie więc decydował czynnik ekonomiczny. Najtańsze nawęglacze to koks odlewniczy, grafit naturalny i antracyt, następnie koks naftowy. Najdroższy jest grafit syntetyczny.

Duże znaczenie przy wprowadzaniu nawęglacza do stałego wsadu ma jego ułożenie w piecu. W miarę możliwości należy zadbać o to, aby materiał nawęglający znalazł się pomiędzy drobnym wsadem stalowym. Zapewni to równoczesne nagrzewanie wsadu i nawęglacza, co pozwoli na zwiększenie wskaźników przyswojenia węgla. Jeżeli nawęglacz będzie za wysoko, to przy stopniowym topieniu będzie wypływał na powierzchnię. Nie należy również wsypywać materiału nawęglającego bezpośrednio na dno pieca, ponieważ w trakcie nagrzewania może nastąpić jego „spiekanie” z wymurówką pieca, co również obniży efektywność i szybkość nawęglania. Będzie to wynikiem znacznego zmniejszenia powierzchni reakcji faz nawęglacz-metal.

Wprowadzanie nawęglacza na powierzchnię kąpieli metalowej to najczęściej stosowana metoda nawęglania. W przypadku stosowania tej metody w piecach łukowych, wymaga ona mieszania kąpieli metalowej. Wynika to z faktu, że w piecach tych intensywny ruch metalu występuje tylko w pobliżu elektrod. Znaczną część pieca stanowią „strefy martwe” o znikomej cyrkulacji ciekłego metalu. W piecach łukowych jest

to metoda tradycyjna o małym stopniu wykorzystania węgla. Uzyskana w ten sposób efektywność może wynosić max. 30%, ze stosunkowo małym wskaźnikiem powtarzalności. Znacznie intensywniej przebiega nawęglanie w tyglu pieca indukcyjnego. Procesy zachodzące w ciekłym metalu znajdującym się w piecu indukcyjnym, przebiegają w warunkach ciągłego ruchu kąpieli. Powoduje to, że w piecach tych można uzyskać stopień wykorzystania węgla dochodzący do 80%. Wymaga to zastosowania odpowiedniego rodzaju nawęglacza, parametrów pracy pieca oraz wydłużenia czasu wytopu. Czas ten może wynosić od kilku do kilkunastu minut. Jest to najczęściej stosowana metoda nawęglania w piecach elektrycznych indukcyjnych i to zarówno przy wytopie żeliwa syntetycznego jak również przy wytwarzaniu żeliwa na bazie surówki. Wynika to z faktu, że po roztopieniu wsadu pobierana jest próbka do analizy chemicznej i na podstawie jej wyników oblicza się i uzupełnia niedobór węgla w ciekłym metalu.

Kolejna możliwość wprowadzania nawęglacza, to jego dozowanie w strumieniu gazu nośnego (powietrza lub argonu). Metoda ta wykorzystywana jest przede wszystkim w piecach elektrycznych łukowych. Duża powierzchnia styku nawęglacz – ciekły metal, w połączeniu z mieszaniami kąpieli przez gaz nośny powoduje uzyskiwanie w tej metodzie bardzo dużych efektywności procesu. Można w ten sposób korygować niedobór węgla nawet do 3%, uzyskując efektywność nawęglania do 95%. Proces ten oprócz wymiaru technologicznego i ekonomicznego pozwala na zmniejszenie uciążliwości pracy wytopiaczy. Wprowadzanie dużych ilości drobnoziarnistych nawęglaczy w strudze gazu nośnego eliminuje ciężką pracę fizyczną. Podczas pneumatycznego wprowadzania nawęglacza gaz nośny wymusza ruch ciekłego metalu i powoduje intensywne odprowadzanie substratów ze strefy reakcji, co w konsekwencji przyspiesza proces wymiany masy. Małe głębokości metalu pozwalają na wprowadzanie lancy tuż pod lustro kąpieli metalowej, co zmniejsza problem jej termicznego zużycia. Zamknięta budowa pieca i wysokie sklepienie umożliwiają stosowanie powietrza jako gazu nośnego, co eliminuje rozpryskiwanie metalu poza piec. Przy zastosowaniu tej metody nawęglania należy uwzględnić jednak fakt obniżania temperatury ciekłego metalu. Spadek ten wynosi średnio 80-100 K na 1% wprowadzonego do ciekłego metalu węgla. Potwierdzają to wyniki wielu badań przeprowadzonych przez autorów artykułu [1, 7]. Kąpiel metalowa oddaje ciepło konieczne do nagrzania wprowadzonego materiału nawęglającego i jego rozpuszczenia oraz nagrzania gazu nośnego. Powstają również straty ciepła wynikające z intensywnego mieszania ciekłego metalu. Powoduje to, że lepszym rozwiązaniem jest wprowadzenie części nawęglacza do stałego wsadu. Najlepiej, aby zawartość węgla w kąpieli metalowej przekraczała 2%. Pozostałą część materiału nawęglającego można wtedy wprowadzić pneumatycznie jednorazowo. Skracza to czas nawęglania oraz czas wytopu. Poza tym topiony stop żelaza zawierający powyżej 2% C nie wymaga aż tak wysokich temperatur, jak złom stalowy bez dodatku węgla.

4. Efektywność nawęglania

Z technologicznego punktu widzenia istotnym parametrem jest efektywność nawęglania E (stopień przyswojenia węgla przez ciekły metal) [1]. Jest to szczególnie ważne przy wytopie żeliwa

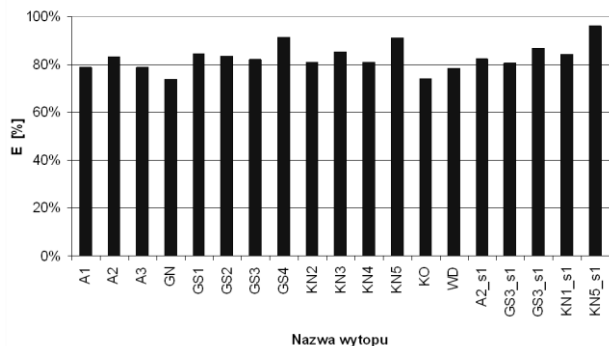
sferoidalnego, gdzie zakładane zawartości węgla są na poziomie 3,50-3,80%.

Wyniki obliczeń efektywności nawęglania uzyskanej przy wytopianiu żeliwa szarego i sferoidalnego (s1 w nazwie rodzaju nawęglacza) metodą wprowadzania materiału nawęglającego do stałego wsadu zamieszczono w tabeli 5 i na rys. 1.

Tabela 5.

Efektywność nawęglania przy wprowadzaniu materiału nawęglającego do stałego wsadu

| Rodzaj nawęglacza | Mm kg | Mn kg | ΔC % | E % |
|-------------------|-------|-------|--------------|--------|
| A1 | 10,37 | 0,38 | 2,63 | 78,90% |
| A2 | 10,38 | 0,43 | 3,22 | 83,00% |
| A3 | 11,57 | 0,52 | 3,39 | 78,80% |
| GN | 10,20 | 0,42 | 2,58 | 73,80% |
| GS1 | 10,22 | 0,36 | 2,96 | 84,70% |
| GS2 | 14,15 | 0,52 | 3,05 | 83,30% |
| GS3 | 11,59 | 0,44 | 3,09 | 82,00% |
| GS4 | 11,50 | 0,44 | 3,47 | 91,20% |
| KN2 | 10,32 | 0,38 | 2,95 | 80,80% |
| KN3 | 14,12 | 0,52 | 3,13 | 85,40% |
| KN4 | 11,57 | 0,45 | 3,13 | 81,10% |
| KN5 | 11,46 | 0,44 | 3,48 | 91,00% |
| KO | 10,22 | 0,53 | 3,34 | 74,00% |
| WD | 11,00 | 0,59 | 3,49 | 78,50% |
| A2_s1 | 10,20 | 0,46 | 3,51 | 82,20% |
| GS3_s1 | 17,20 | 0,68 | 3,16 | 80,50% |
| GS3_s1 | 10,00 | 0,4 | 3,44 | 86,60% |
| KN1_s1 | 10,35 | 0,46 | 3,71 | 84,20% |
| KN5_s1 | 10,20 | 0,4 | 3,76 | 96,10% |

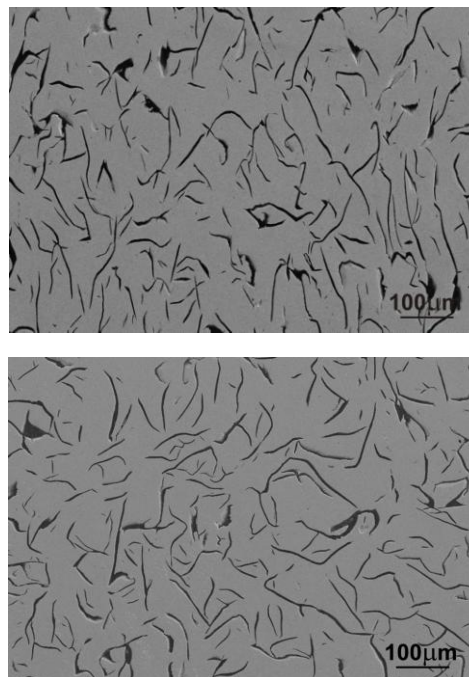


Rys. 1. Efektywność nawęglania uzyskana przy wytopie żeliwa szarego i sferoidalnego

Efektywność nawęglania zmieniała się w realizowanym procesie badawczym w zakresie 69,5-96%. Najniższy stopień przyswojenia węgla uzyskano dla grafitu naturalnego i koksu odlewniczego. Antracyt rozpuszcza się znacznie wolniej i po roztopieniu wsadu część cząstek wypływa na powierzchnię. Wymagało to dodatkowego czasu i podgrzania metalu do wyższej temperatury. Najlepiej rozpuszcza się grafit syntetyczny i koks naftowy KN5. Praktycznie po roztopieniu wsadu nie ma na powierzchni kąpieli metalowej cząstek tych nawęglaczy [8].

5. Struktura

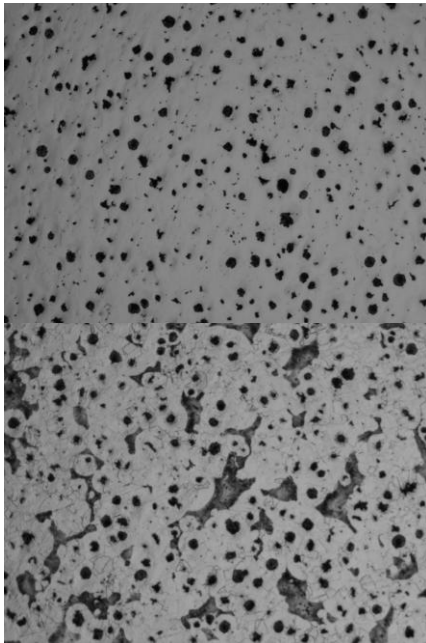
W przypadku wytopu żeliwa na bazie złomu stalowego często zadawane jest pytanie o strukturę wytwarzanego żeliwa, a w szczególności, czy nawęglacze nie powodują degradacji struktury? Przykładowe zdjęcia struktur żeliwa szarego przedstawiono na rys. 2.



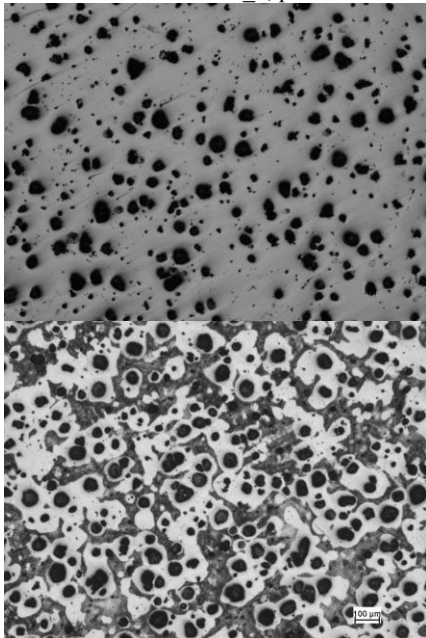
Rys. 2. Zdjęcia struktury żeliwa szarego nawęglanego grafitem syntetycznym (u góry) i żeliwa wytopionego na bazie surówki (na dole)

Na podstawie obrazów struktur stwierdzono, że zarówno dla żeliwa wytopionego na bazie surówki, jak i na bazie złomu stalowego występują pewne różnice w kształcie wydzieleni grafitu, jego wielkości i ilości. Największą grupę stanowią obszary z równomiernymi wydzieleniami grafitu płatkowego. Pojawiają się także obszary z międzydendrycznym rozmieszczeniem płatków grafitu o uporządkowanej orientacji oraz obszary z wydzieleniami „zwichrzonymi”. Zauważono także pewną prawidłowość, która wymaga dalszych badań. Na podstawie przeprowadzonej analizy ilościowej stwierdzono, że w żelwie nawęglanym antracytem występują mniejsze wydzielenia grafitu. Dla żeliwa tego uzyskano większą wytrzymałość i twardość.

Analizę ilościową przeprowadzono również dla żeliwa sferoidalnego. Uzyskane obrazy struktur przedstawiono na rys. 3 i 4. W realizowanych badaniach analizowano ilość, długość, szerokość, obwód (O) i pole powierzchni (P) wydzieleni. Obliczano i analizowano także współczynnik CK (okrągłość) określany zależnością: $CK = 4 \cdot \pi \cdot P / O^2$.



Rys. 3. Struktura żeliwa sferoidalnego wytopionego na bazie surówki S_1, pow. 50x



Rys. 4. Struktura żeliwa sferoidalnego wytopionego na bazie koksu naftowego KN1_s1, pow. 50x

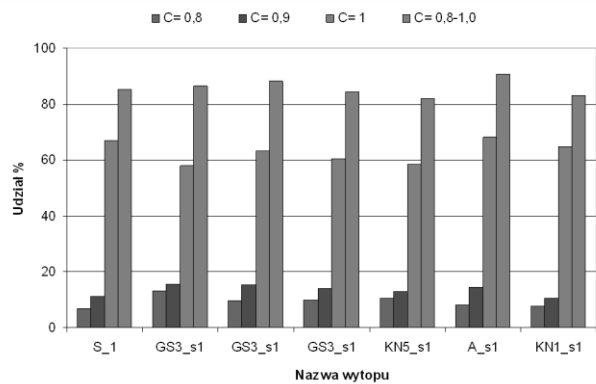
W wytopionych gatunkach żeliwa w przeważającej części uzyskano grafit sferoidalny. Pojawiły się także niewielkie obszary grafitu zwartego (wermikularnego). W dwóch z badanych gatunków żeliwa uzyskano strukturę o osnowie ferrytyczno-perlitycznej (S_1 i KN1_s1), a w pozostałych wytopach perlityczną z niewielkimi obszarami ferrytu. Największą ilość ferrytu uzyskano w wytopach S_1 – około 90 %, KN1_s2 – 74%.

Spośród wielu parametrów proponowanych do oceny wybrano współczynnik CK (okrągłość, cyrkulacyjność). Wartość tego współczynnika jest równa 1 tylko dla okręgów; wszystkie inne kształty posiadają współczynnik okrągłości o wartości mniejszej niż 1. Wyniki pomiarów i obliczeń udziałów procentowych wydzielen dla określonych wartości współczynnika C dla żeliwa sferoidalnego zestawiono w tab. 6. oraz na rys. 5

Tabela 6.

Wartości współczynnika CK dla przeprowadzonych wytopów

| Nazwa wytopu | Współczynnik CK [%] | | | | |
|--------------|---------------------|------|------|---------|---------|
| | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 0,9-1,0 | 0,8-1,0 |
| S_1 | 7,0 | 11,2 | 67,1 | 78,4 | 85,3 |
| GS3_s1 | 13,1 | 15,6 | 57,9 | 73,5 | 86,6 |
| GS3_s1 | 9,5 | 15,4 | 63,5 | 78,8 | 88,3 |
| GS3_s1 | 10,0 | 14,1 | 60,4 | 74,4 | 84,4 |
| KN5_s1 | 10,4 | 12,9 | 58,7 | 71,6 | 82,0 |
| A_s1 | 8,2 | 14,3 | 68,2 | 82,5 | 90,8 |
| KN1_s1 | 7,7 | 10,6 | 64,9 | 75,5 | 83,3 |



Rys. 5. Udział procentowy wydzielen o określonej wartości współczynnika CK

Przedstawiony współczynnik pokazuje, że wytopione żeliwo sferoidalne zawiera powyżej 83,2% grafitu, dla którego współczynnik CK jest większy niż 0,8. Można zauważyć niewielkie różnice dla poszczególnych wytopów. Uzyskane wartości świadczą o tym, że we wszystkich wytopach otrzymano jakościowe żeliwo sferoidalne.

6. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że można realizować wytopy żeliwa szarego i sferoidalnego wyłącznie na bazie złomu stalowego i nawęglaczy. Należy jednak zaznaczyć, że stosowanie do wsadu wyłącznie złomu stalowego w produkcji żeliwa sferoidalnego niesie pewne ograniczenia asortymentowe. Z uwagi na wyższą zawartość manganu w złomie stalowym nie można otrzymać żeliwa ferrytycznego. Można teoretycznie co prawda stosować złom z blach głębokotłocznych, gdzie zawartość manganu wynosi ok. 0,25%, ale istnieją ograniczenia w dostępie takiego złomu. Odpady produkcyjne z tego typu blach są już najczęściej ocykowane, co również ogranicza możliwość stosowania. Kolejne

ograniczenie to duża objętość tego typu cienkich blach. Są to jedyne ograniczenia w stosowaniu złomu stalowego do produkcji żeliwa sferoidalnego. Poza tym złom stalowy posiada znacznie mniejsze ilości zanieczyszczeń siarką, fosforem oraz gazami, co zapewnia lepszą jakość żeliwa szarego i sferoidalnego oraz mniejsze zużycie zaprawy sferoidyzującej. W przypadku wytopu żeliwa sferoidalnego na bazie złomu stalowego należy zapewnić dobrej jakości nawęglacz, z czym nie ma obecnie problemu na rynku.

Mimo wysokiej końcowej zawartości węgla w żelwie uzyskane efektywności przy wprowadzaniu materiału nawęglającego do stałego wsadu w piecu indukcyjnym zmieniały się w zakresie 73-96%. Efektywności nawęglania są zbliżone zarówno dla żeliwa szarego, jak i sferoidalnego. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że można dla danego pieca i nawęglacza uzyskać bardzo wysokie i powtarzalne wyniki nawęglania.

W wytopach żeliwa szarego uzyskano grafit płatkowy równomiernie rozmieszczony na większości obszarów. Uzyskano również wydzielenia grafitu międzycytrycznego i zwichrzonego zarówno dla żeliwa wytopionego na bazie surówki jak i złomu stalowego. W przeważającej części uzyskano osnowę perlityczną z niewielkimi obszarami ferrytu.

W wytopach żeliwa sferoidalnego uzyskano wydzielenia grafitu w postaci sferoidów. Ilość tych wydzieleni we wszystkich wytopach przekracza wartość 83%. Pojawiają się także niewielkie obszary grafitu zwarte (wermikularnego), ale powodem ich istnienia mogą być warunki krzepnięcia a nie jakość materiałów wsadowych. Osnowę ferrytyczną i ferrytyczno-perlityczną uzyskano tylko w wytopach o bardzo małej zawartości manganu (0,1 i 0,22%). W pozostałych przypadkach otrzymano strukturę perlityczną z niewielkimi obszarami ferrytu.

Zarówno w przypadku żeliwa szarego jak i sferoidalnego nie zauważono żadnych przypadków degradacji struktury mogących wynikać z wyeliminowania surówki ze wsadu i zastosowania złomu stalowego. Wprowadzenie natomiast złomu stalowego do produkcji żeliwa sferoidalnego jest

z pewnością działaniem proekologicznym, do którego powinno przekonywać się coraz więcej odlewni.

Literatura

- [1] Janerka, K. (2010). *Nawęglanie ciekłych stopów żelaza*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
- [2] Janerka, K., Bartocha, D. & Szajnar, J. (2009). Quality of carburizers and its influence of carburization process. *Archives of Foundry Engineering*. 9 (3), 249-254.
- [3] Janerka K., Szajnar J., Bartocha D., Jezierski J. (2010). Wytwarzanie żeliwa syntetycznego w aspekcie mniejszej uciążliwości dla środowiska, *Archives of Foundry Engineering*, vol. 10, Special Issue 2, s. 77-82.
- [4] Janerka K., Szajnar J., Jezierski J., Bartocha D. (2011). Czynniki wpływające na wskaźniki procesu nawęglania, *Archives of Foundry Engineering*, PAN Katowice, vol. 11, Special Issue 3, s. 89-96.
- [5] Janerka K., Szajnar J. (2010). Metody nawęglania ciekłego żeliwa i ich skuteczność, *Tendencje Optymalizacji Systemu Produkcyjnego w Odlewniach*, Monografia, Łódź, rozdział 9 w monografii, s. 111-124.
- [6] Janerka K., Bartocha D., Szajnar J., Cholewa M. (2007). The influence of different kind of carburizers and carburization on the effectiveness and iron structure, *Archives of Metallurgy and Materials*. vol. 52, iss. 3, s. 467-474.
- [7] Kanafek M., Homa D., Janerka K. (1999). Nawęglanie żeliwa w Odlewni TEKSID Poland S.A. za pomocą urządzenia pneumatycznego POLKO. *Przegląd Odlewnictwa*, nr 7.
- [8] Janerka K., Bartocha D., Jezierski J., Szajnar J. (2010). The effect of the carburiser quality on the cast iron recarburisation process. *Foundry Trade Journal International*, 184, 3679, 2010, s. 282-286.

Grey Cast Iron and Ductile Iron Melting Without Pig Iron

Abstract

The problems presented in the article relate to the environmental protection issue in indirect but very significant way. They cover the issue of grey and ductile cast iron production exclusively on the steel scrap base. The pig iron limitation or even complete elimination from solid charge results both in economic and ecological benefits. The main topics related to carburization process in electric furnaces were presented in the article. The influence of the carburizer type on the chemical composition, microstructure and the properties of the produced cast iron were described. The limitations in ductile iron production on the steel scrap were indicated, too.

Keywords: grey cast iron, ductile iron, ferrous alloys carburization, carburization efficiency, cast iron microstructure