

CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA PARAMETRY PROCESU PNEUMATYCZNEGO NAWĘGLANIA

K. JANERKA¹

Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Odlewnictwa,
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska,
44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7,

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wpływ parametrów pneumatycznego nawęglania na szybkość i efektywność procesu oraz spadek temperatury ciekłego metalu. Analiza obejmuje dobór urządzeń, parametry ich pracy, temperaturę i skład chemiczny ciekłego metalu oraz rodzaj nawęglacza. Przedstawiono również hipotetyczny obraz strumienia dwufazowego wprowadzanego do ośrodka ciekłego, na podstawie przeprowadzonych badań modelowych.

Key words: pneumatic recarburization, liquid metal, injection.

1. WPROWADZENIE

Nawęglanie ciekłego metalu metodą pneumatyczną polega na wprowadzeniu materiału grafitowego w strumieniu gazu nośnego (najczęściej powietrza) do kąpielii metalowej. Jest to metoda znana i stosowana w wielu odlewniach, ponieważ umożliwia znaczną korektę węgla w ciekłym metalu w bardzo krótkim czasie, czego nie zapewniają metody tradycyjne. Problem dowęglania kąpielii metalowej pojawia się w odlewniach cyklicznie. Wynika to z różnicy cen materiałów wsadowych (żłom stalowy i surówka) ich dostępności na rynku i produkowanego asortymentu odlewów. Doświadczenia ostatnich lat wykazały, że nawet przy dużym wzroście cen złomu stalowego wzrastają również ceny surówki i różnica przy zakupie tych materiałów jest znaczna. Opłacalne jest więc zmniejszenie udziału surówki we wsadzie lub jej wyeliminowanie, zastąpienie żłodem stalowym i dowęglanie ciekłego metalu. Poniżej

¹ dr inż., krzysztof.janerka@polsl.pl

przedstawiono podstawowe spostrzeżenia dotyczące procesu pneumatycznego nawęglania. Są one wynikiem wieloletnich badań prowadzonych na stanowiskach badawczych i w odlewniach przez pracowników Zakładu Odlewnictwa Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Politechniki Śląskiej [1, 2, 3]. W Zakładzie Odlewnictwa realizowane są również eksperymenty mające na celu wyjaśnienie wpływu zmiany materiałów wsadowych na strukturę i własności produkowanego żeliwa [4].

2. DOBÓR URZĄDZEŃ DO PNEUMATYCZNEGO NAWĘGLANIA

Podstawowe stanowisko do nawęglania ciekłego metalu składa się z urządzenia dozującego i rurociągu transportowego zakończonych lancą wprowadzaną tuż pod powierzchnię kąpiel metalowej, która stanowi „urządzenie odbiorcze” sproszkowanego nawęglacza. Z uwagi na fakt, iż układ urządzeń i jego działanie było już wielokrotnie przedstawiane [5, 6] i znane jest Czytelnikom Archiwum Odlewnictwa nie zamieszczono go w niniejszym artykule.

Dla zapewnienia poprawnej realizacji procesu dowęglania urządzenie dozujące sproszkowany nawęglacz do ciekłego metalu powinno zapewniać:

- możliwie prostą regulację natężenia przepływu gazu i materiału (regulacja nacisków na reduktorach, wymiana dysz) w znacznym zakresie. Pozwala to na dobór parametrów w zależności od zastosowanej średnicy lancy i rurociągu transportowego, co zapewnia odpowiednie parametry procesu wdmuchiwania nawęglacza,
- stabilną pracę w trakcie podawania nawęglacza (nawet przy zmiennym nacisku na wylocie lancy spowodowanym różną jej głębokością zanurzenia),
- możliwość szybkiej wymiany lancy w przypadku jej zużycia,
- obserwację masy wprowadzonego do ciekłego metalu nawęglacza.

Dobór urządzeń i ich konfiguracja jest zależna od wielu czynników, a mianowicie:

- wielkości pieca, do którego wprowadzany jest nawęglacz
Podajnik komorowy musi posiadać pojemność zapewniającą przebieg co najmniej jednego cyklu nawęglania, bez konieczności jego uzupełniania. Z wielkością pieca związane jest również natężenie przepływu nawęglacza wynikające z cech geometrycznych rurociągu transportowego i lancy. Wydajność urządzenia powinna być dobrana tak, aby zapewnić maksymalne przyswojenie węgla przez ciekły metal przy jak najkrótszym przebiegu procesu.
- częstości stosowania urządzenia

Przy częstym prowadzeniu procesu (kilka razy na dobę) konieczne jest posadowienie nad podajnikiem komorowym zbiornika zapewniającego co najmniej dobowy zapas nawęglacza. Zbiornik taki może być załadowywany z big – bagów. Ułatwia to znacznie obsługę stanowiska i zapewnia ciągłość produkcji. Przesyp materiału ze zbiornika dobowego realizowany może być przez obsługę z pulpitu sterowniczego. Przy dużej ilości i częstotliwości dozowania nawęglacza należy wyposażyć urządzenie w manipulator lancy, który zapewnia nie tylko

powtarzalność procesu, ale przede wszystkim ułatwia pracę obsłudze pieca, eliminując ręczne wprowadzanie i trzymanie lancy.

- stopnia automatyzacji
Czynnik ten zależy jest przede wszystkim od wymagań odlewni. Stosowane obecnie urządzenia mogą pracować w układzie sterowania ręcznego - wszystkie czynności wymagane przy obsłudze podajnika podczas pracy (otwarcie i zamknięcie zaworu odcinającego dopływ powietrza do urządzenia i zbiornika oraz zaworu odpowietrzającego; otwarcie i zamknięcie zaworu dzwonowego oraz dyszy) są wykonywane przez operatora, który dźwigniami zaworów odcinających i przyciskami zaworów rozdzielających (sterujących siłownikami) steruje pracą urządzenia, półautomatycznym (obsługa polega na sekwencyjnym wciskaniu przycisków na pulpicie sterowniczym podajnika, które poprzez elektrozawory otwierają lub zamykają odpowiednie urządzenia) lub automatycznym (wpisuje się z klawiatury zakładaną ilość nawęglacza, który ma być wprowadzony i wciska się przycisk „start”. Po podaniu porcji układ wyłącza się samoczynnie). Każde urządzenie powinno być posadowione na wadze, gdyż tylko wtedy można obserwować ilość dozowanego materiału.
- jakość gazu nośnego
W części zasilania układu sprężonym powietrzem w wielu przypadkach z uwagi na złą jakość sprężonego powietrza w sieci zakładowej zamontowany musi być odwadniacz i ewentualnie filtr powietrza, eliminujący zanieczyszczenia wodne i olejowe, wpływające na jakość metalu i bezpieczeństwo prowadzenia procesu.

3. WSKAŹNIKI NAWĘGLANIA

Istotnymi wskaźnikami charakteryzującymi proces nawęglania jest efektywność (stopień przyswojenia węgla przez ciekły metal) i szybkość nawęglania.

- efektywność nawęglania określana jest zależnością:

$$E = m_m \frac{(C_k - C_p)}{m \cdot C_x} \quad (1)$$

gdzie: C_p – zawartość węgla na początku procesu [%], C_k – zawartość węgla na końcu procesu [%], m_m – masa metalu [Mg], m_n – masa porcji materiału nawęglającego [Mg], C_x – zawartość węgla w materiale nawęglającym

- szybkość nawęglania określa równanie:

$$S = \frac{(C_k - C_p)}{t} \quad (2)$$

gdzie: t – czas nawęglania [s]

Parametr ten jest wyrażany jako procentowy przyrost węgla w jednostce czasu. Takie ujęcie jest bardzo kłopotliwe i mało miarodajne przy porównywaniu uzyskanych

wyników na różnych jednostkach piecowych. Dokonując obliczeń szybkości nawęglania w piecu o pojemności 3 Mg i 30 Mg, gdzie w ciągu 60 s uzyskano przyrost węgla o 0,2 %C, otrzymamy ten sam wynik (w piecu 30 Mg musimy wprowadzić 10 razy więcej nawęglacza niż do pieca o pojemności 3 Mg). Stąd wydaje się celowym wprowadzenie szybkości nawęglania jako masowego przyrostu węgla w jednostce czasu [kg/s], co przedstawia zależność:

$$S_j = \frac{\Delta C \cdot m_m}{100 \cdot t} \quad (3)$$

Pozwala to na porównanie i analizę uzyskanych wartości dla różnej masy ciekłego metalu.

4. PARAMETRY CHARAKTERYZUJĄCE STRUMIEŃ DWUFAZOWY

Podstawowe parametry charakteryzujące przemieszczanie strumienia dwufazowego to objętościowe natężenie przepływu gazu V_g określane w m^3 lub masowe m_g wyrażane w kg na jednostkę czasu. Kolejny istotny parametr to natężenie przepływu materiału m_c (wydajność), określające ilość przetransportowanego nawęglacza m_n w czasie t stabilnej pracy instalacji. Stosowane jest także stężenie masowe mieszaniny (koncentracja) będące ilorazem natężenia przepływu materiału do natężenia przepływu gazu.

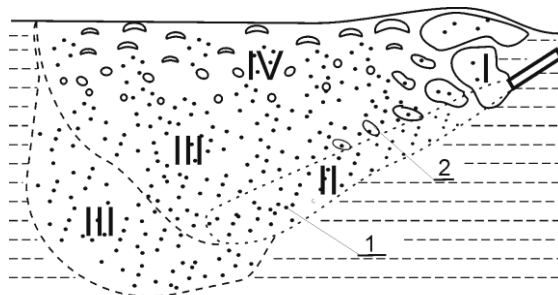
Podczas wprowadzania strumienia dwufazowego do ośrodka ciekłego można wyróżnić dwa stany przepływu: barbotaż i przepływ strumieniowy. Pierwszy jest charakterystyczny dla małych natężeń przepływu materiału i prędkości wylotowych z lancy. Transport masy odbywa się jedynie na powierzchni pęcherzy, które ulegają deformacji i rozpadowi dopiero pod samą powierzchnią ciekłego ośrodka, do którego są wprowadzane. Drugi stan jest charakterystyczny dla dużych natężeń przepływu materiału i prędkości wylotowych z lancy. Deformacja i rozpad pęcherzy występuje już na wylocie z lancy, przez co zwiększa się powierzchnia reakcji cieczy z wprowadzanym stałym materiałem. Jest to przypadek znacznie korzystniejszy od barbotażu i należy dążyć do osiągnięcia na wylocie lancy parametrów zapewniających przepływ strumieniowy. Trudność rozwiązania zagadnienia wynika z braku wyraźnej granicy rozdziału tych dwóch stanów, stąd istnieje wiele teorii dotyczących wielkości tych parametrów i powiązania ich z różnymi liczbami kryterialnymi. Farias, Roberstson i Kimura do analizy charakteru strumienia wprowadzają liczbę przepływu N_E i liczbę strumienia N_j będącą iloczynem poszczególnych składników [7, 8]. Z praktycznego punktu widzenia określenie wartości tych liczb jest uciążliwe ze względu na zawarte w nich takie czynniki jak: gęstość gazu i metalu oraz wskaźnik wielkości pęcherzy. Biorąc pod uwagę fakt, iż gęstość ciekłego żeliwa i powietrza, które jest stosowane w procesie nawęglania zmieniają się nieznacznie, uproszczono powyższe zależności do postaci:

$$N_{E_{\text{mod}}} = 1,1357 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{m_c}{m_g^{0,6} d_c} \quad (4)$$

$$N_{j_{\text{mod}}} = 3,697 \cdot 10^{-4} \frac{m_c w}{m_g d_c} \quad (5)$$

Przeprowadzone porównanie współczynników N_E i N_j z zaproponowanymi powyżej zależnościami wykazało bardzo wysoką zbieżność uzyskanych wyników.

Jedyną metodą obserwacji strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym i określenia wpływu parametrów pneumatycznego przemieszczania na jego kształt i zasięg są badania modelowania fizycznego. Na podstawie zrealizowanych w Zakładzie Odlewnictwa IMiB Politechniki Śląskiej eksperymentów można stwierdzić jak wpływają parametry strumienia, wielkość cząstki i gęstość ośrodka na zasięg i kształt tego strumienia [9, 10]. Na rys 1. przedstawiono hipotetyczny obraz strumienia dwufazowego. Wyróżnić w nim można pewne charakterystyczne strefy. Strefa I – bezpośrednio przy wylocie z lancy. W obszarze tym powstają duże pęcherze gazowe o nieregularnych kształtach. Ich wielkość i ilość jest zależna od przepływu gazu. Przy większych natężeniach znacznie szybciej będzie zachodziło ich odrywanie od krawędzi lancy, rozpad i powstawanie nowych. Prawdopodobnie zostaną w nich zamknięte cząstki nawęglacza, które będą miały kontakt z ciekłym metalem po pęknięciu pęcherza. Może to jednak nastąpić tuż pod lub na powierzchni lustra metalu. Wymiana masy nastąpi wówczas na wskutek ruchu metalu i pływających na powierzchni ziaren nawęglacza. Jest to zjawisko niekorzystne i można je minimalizować zwiększając prędkość gazu na wylocie z lancy.



Rys. 1. Kształt i obszary strumienia dwufazowego, 1 – cząstki nawęglacza, 2 – pęcherze gazowe.
Fig. 1. Shape and areas of diphase stream, 1 – carburizer particles, 2- gas bubbles.

Strefa II to obszar bezpośredniego zasięgu strumienia. Składa się ona przede wszystkim z cząstek materiału nawęglającego, gdyż tylko one posiadają na tyle dużą energię, aby przeniknąć do ciekłego metalu na taką odległość. Należy przypuszczać, iż proces wymiany masy będzie w tej strefie najbardziej intensywny. Wynika to z faktu, że cząstki posiadają znaczną prędkość i przez to grubość przypowierzchniowej warstwy

dyfuzyjnej będzie bardzo mała. Strefa III to obszar cząstek o najmniejszych wymiarach mających bezpośredni kontakt z ciekłym metalem. Jego powierzchnia będzie największa i należy przypuszczać, że decyduje ona o skuteczności procesu. Wielkość tego obszaru jest konsekwencją powstawania strefy II. Strefa IV to pęcherze gazowe o kształcie kuli, elipsoidy lub czaszy kulistej. Zależne to będzie od miejsca powstania pęcherza i jego wielkości. Przesuwając się w kierunku powierzchni będzie malało ciśnienie hydrostatyczne, co spowoduje ich wzrost. W przypadku ciekłego metalu dodatkowo będą się one nagrzewały i zwiększały swoją objętość. Ich pękanie nastąpi tuż pod lub na powierzchni lustra metalu i część cząstek zostanie tam wyniesiona. Wewnątrz tych pęcherzy mogą zostać zamknięte cząstki nawęglacza i wymiana masy nastąpi po ich rozerwaniu pod powierzchnią ciekłego metalu, co znacznie obniży efektywność całego procesu.

Podsumowując przebieg badań modelowych należy stwierdzić:

- wzrost parametrów przepływu (natężenia przepływu gazu i materiału) powoduje zwiększenie pola powierzchni, szerokości i zasięgu strumienia dwufazowego.
- zwiększenie wartości liczby przepływu N_j i liczby strumienia N_E powoduje wzrost przenikania strumienia dwufazowego,
- gęstość ośrodka ciekłego obniża wartości analizowanych parametrów. Wzrost gęstości o 18 % powoduje zmniejszenie powierzchni o 49%, długości przenikania strumienia o 22%,
- wdmuchiwanie drobnych cząstek jest bardzo korzystne nie tylko z punktu widzenia metalurgicznego (duża powierzchnia styku reagujących faz), ale również z uwagi na uzyskiwanie znacznie większej powierzchni strumienia dwufazowego i zwiększenia przez to strefy bezpośredniego oddziaływania metal – nawęglacz.

5. WŁASNOŚCI CIEKŁEGO METALU

Istotne znaczenie dla uzyskiwanych wskaźników procesu nawęglania ma temperatura T_p i skład chemiczny ciekłego metalu (początkowa C_p i końcowa C_k zawartość węgla, zawartość siarki S i krzemu Si). Korzystne jest prowadzenie procesu nawęglania w zakresie temperatur 1673 – 1723 K. Niskie temperatury powodują obniżenie współczynnika dyfuzji i słabsze przyswojenie węgla. Wyższe temperatury to wzrost współczynnika dyfuzji, ale bardziej intensywne wypalanie węgla i w konsekwencji niższe efektywności.

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że w procesie pneumatycznego nawęglania wzrost początkowej zawartości węgla w ciekłym metalu nie powoduje znacznego spadku efektywności, nawet przy zawartościach w granicach 3%.

Analizę wpływu tych czynników na wskaźniki procesu zostały przedstawione poniżej.

6. MATERIAŁ NAWĘGLAJACY

Duże znaczenie w procesie pneumatycznego nawęglania ma materiał nawęglający. Nie ulega wątpliwości, że powinien on być bardzo drobny, gdyż zwiększy się wtedy powierzchnia kontaktu z ciekłym metalem. Jednak stosowanie do procesu nawęglania zbyt drobnych nawęglaczy (granulacja 0 – 0,3 mm, ciężar usypowy ok. 500 kg/m³), powoduje powstanie problemów ze stabilnym ich przemieszczaniem. Następuje wtedy zawieszanie materiału w zbiorniku i nierównomierny transport (obrywanie nawisów). Zastosowanie w podajniku układów fluidyzujących poprawia dozowanie materiału, ale i tak uzyskiwane wydajności są bardzo niskie, co powoduje wydłużenie czasu nawęglania. Dlatego w procesie pneumatycznego wdmuchiwania najbardziej korzystne są materiały o ziarnistości 0 – 3 mm, z przewagą frakcji drobnych. Istotne znaczenie dla uzyskiwanych wskaźników nawęglania ma skład chemiczny nawęglaczy. Powinny one posiadać jak najwyższą zawartość węgla, oraz jak najmniej popiołu i siarki. Duża zawartość popiołu powoduje spadek efektywności nawęglania, gdyż procesy wymiany masy w strefie reakcji będą przebiegały znacznie wolniej. Materiały węglowe nie powinny zawierać zbyt dużych ilości siarki, gdyż powoduje to wzrost tego pierwiastka w ciekłym metalu, a w konsekwencji powstanie wytopów nietrafionych. Jako materiały nawęglające można stosować mielony złom grafitowy oraz produkty uboczne powstałe w procesie produkcyjnym elektrod grafitowych. Nie należy używać w procesie pneumatycznego nawęglania pyłów węglowych, gdyż cechują się one znaczną wybuchowością i instalacje transportu pneumatycznego powinny wtedy posiadać odpowiednie zabezpieczenia (klapy przeciwybuchowe). Ponadto większość pyłów węglowych posiada znaczną zawartość siarki, co również eliminuje je do stosowania w procesie nawęglania.

7. ANALIZA WPŁYWU POSZCZEGÓLNYCH CZYNNIKÓW NA WSKAŹNIKI PROCESU NAWĘGLANIA

W przeprowadzonych eksperymentach uzyskano bardzo wysokie efektywności i szybkości nawęglania. Efektywność zmieniała się w zakresie od 60–99 %, natomiast szybkość od 0,0012–63 %C/s. Rozpiętość uzyskanych wyników jest tak duża, ponieważ w procesie badawczym zmieniano w szerokim zakresie parametry pneumatycznego przemieszczania i materiały nawęglające (średnica cząstek i zawartość węgla). Badania prowadzono w warunkach przemysłowych, co wymagało dostosowania się do składu chemicznego ciekłego metalu przed procesem nawęglania, wynikającego z potrzeb danej odlewni. Analizę wpływu poszczególnych parametrów procesu na szybkość i efektywność nawęglania przedstawiono poniżej.

Natężenie przepływu powietrza zmieniało w zakresie $m_g = 0,0514-0,1411$ [kg/s], natomiast natężenie przepływu proszku zmieniało się w granicach $m_c = 0,2234-2,1905$ [kg/s], powodując uzyskanie koncentracji mieszaniny μ nawet do 42,6 [kg/kg].

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i obliczeń szybkości nawęglania przeprowadzono analizę statystyczną. W analizie tej uwzględniono wpływ zarówno

parametrów pneumatycznego przemieszczania jak również wskaźników charakteryzujących ciekły metal. Wynikiem jest następujące równanie:

$$S = -1,4 \cdot 10^{-2} - 2,4 \cdot 10^{-2} m_g + 1,7 \cdot 10^{-3} m_c + 9,8 \cdot 10^{-6} T_p - 5,8 \cdot 10^{-4} C_p \quad (6)$$

$$+ 2,4 \cdot 10^{-3} \Delta C - 1,05 \cdot 10^{-7} m_m$$

$$R = 0,9046 \quad F = 32,26 \quad S = 0,0035 \quad SY = 17,4\%$$

gdzie: F – test Fishera, R – współczynnik korelacji, S – wartość średnia, SY - odchylenie standardowe.

Można z niego wywnioskować, iż w zakresie prowadzonych eksperymentów, natężenie przepływu gazu powoduje obniżenie szybkości nawęglania. Z punktu widzenia przebiegu procesu należy zapewnić odpowiednią dynamikę strumienia dwufazowego (min. prędkość na wylocie z lancy), a ta wynika bezpośrednio z natężenia przepływu gazu. Wzrost natężenia przepływu materiału powoduje zwiększenie szybkości nawęglania w analizowanym zakresie badań. Wystąpi jednak granica, po przekroczeniu której materiał nie zostanie całkowicie „przyswojony” przez ciekły metal i będzie wypływał na powierzchnię, co może powodować obniżenie szybkości nawęglania. Wzrost temperatury ciekłego metalu powoduje podwyższenie szybkości procesu, co pokrywa się z krzywą nawęglania. Z kolei masa ciekłego metalu powoduje jej obniżenie, podobnie jak wzrost początkowej zawartości węgla w stopie.

$$E = -93,8 - 98,7 m_g - 17,9 m_c + 9,2 \cdot 10^{-2} T_p + 7,2 C_p \quad (8)$$

$$+ 2,09 \Delta C + 6,67 \cdot 10^{-4} m_m - 3,7 Si$$

$$R = 0,5968 \quad F = 3,31 \quad E = 81,2964 \quad SY = 10,9\%$$

Analizując efektywność nawęglania należy stwierdzić, iż zarówno wzrost natężenia przepływu gazu jak i materiału powoduje obniżenie efektywności procesu. Podobnie jest przy zwiększeniu zawartości krzemu w ciekłym żeliwie. Zwiększenie temperatury powoduje wzrost efektywności nawęglania. Pozostałe parametry (ΔC , m_m) wymagają dodatkowej analizy, gdyż ich wpływ nie pokrywa się z przewidywaniami.

Przeprowadzono również analizę wpływu współczynników strumienia na wskaźniki procesu nawęglania. W zrealizowanych eksperymentach uzyskano następujące zakresy zmienności współczynników charakteryzujących przepływ: zmodyfikowany współczynnik przepływu $N_{Emod} = 0,34 \div 3,84$, zmodyfikowany współczynnik strumienia $N_{jmod} = 502 \div 2102$.

Przeprowadzona analiza statystyczna z uwzględnieniem różnych parametrów procesu wdmuchiwania proszków pozwoliła na uzyskanie następujących wyników:

$$S = -1,5 \cdot 10^{-2} + 1,2 \cdot 10^{-3} N_{E_{mod}} + 9,2 \cdot 10^{-6} T_p - 1,6 \cdot 10^{-6} C_p \quad (9)$$

$$+ 1,7 \cdot 10^{-3} C_k - 5,5 \cdot 10^{-8} m_m$$

R = 0,9258 F = 49,21 S = 0,0034 SY = 15,75%

$$E = -1,07 \cdot 10^{-2} - 7,35 N_{E_{mod}} + 9,8 \cdot 10^{-2} T_p - 11,5 C_p \quad (10)$$

$$+ 1,56 \cdot 10^{-3} C_k - 2,56 \cdot 10^{-8} m_m$$

R = 0,5450 F = 3,72 E = 81,2964 SY = 11,19%

$$S_j = -4,3 \cdot 10^{-2} + 4,0 \cdot 10^{-2} N_{E_{mod}} + 9,7 \cdot 10^{-6} T_p + 9,2 \cdot 10^{-3} C_p \quad (11)$$

R = 0,9621 F = 203,11 S_J = 0,0673 SY = 24,56%

Z uzyskanych zależności wynika, iż przy wzroście zmodyfikowanego współczynnika przepływu $N_{E_{mod}}$ efektywność nawęglania maleje, natomiast szybkość nawęglania wzrasta. Zwiększanie masy metalu i początkowej zawartości węgla w ciekłym metalu obniża szybkość i efektywność nawęglania.

Przedstawione powyżej zależności pokazują, iż przy wprowadzeniu jednostkowej szybkości nawęglania uzyskano znaczny wzrost parametrów statystycznych. Wprowadzona wielkość znacznie lepiej opisuje proces nawęglania i staje się bardziej uniwersalną, niezależną od masy ciekłego metalu. Daje to możliwość porównywania uzyskanych szybkości nawęglania w różnych jednostkach piecowych.

8. SPADEK TEMPERATURY CIEKŁEGO METALU

Podczas każdego zabiegu prowadzonego w ciekłym metalu następuje spadek jego temperatury. Poniżej przedstawiono wyniki analizy statystycznej wpływu poszczególnych parametrów na spadek temperatury ΔT :

$$\Delta T = -19,5 + 8,37 \cdot 10^{-2} m_n - 4,35 \cdot 10^{-4} m_m + 41,8 \cdot \Delta C + 382,9 \cdot m_g$$

R = 0,6854 F = 6,42 $\Delta T = 45,97$ SY = 47,86%

Z równania tego wynika, że wraz ze wzrostem masy metalu m_m uzyskujemy mniejszy spadek temperatury. Zwiększenie natężenia przepływu gazu, przyrostu zawartości węgla i masy nawęglacza powoduje wzrost wartości spadku temperatury.

W analizie dokonano obliczenia współczynnika stosunku przyrostu węgla do spadku rzeczywistego temperatury kąpieli metalowej ($\Delta C/\Delta T$). Wartość tego współczynnika oscylowała w granicach $0,0036 \div 0,0659$ %C/K. Wartość średnia tego współczynnika wynosiła 0,0124. Wynika z tego, że przy średnim przyroście węgla o wartość 0,0124 %C temperatura kąpieli spadnie o 1 K.

9. NAWĘGLANIE W PIECACH INDUKCYJNYCH

Przedstawione powyżej analizy i obliczenia dotyczą w głównej mierze pieców elektrycznych łukowych. Ze względu na geometrię pieców indukcyjnych, pneumatyczne nawęglanie w nich jest zagadnieniem bardziej skomplikowanym. Duża głębokość pieca w porównaniu do średnicy powoduje, że w celu zapewnienia przenikania nawęglacza, należy zanurzyć lancę na znaczną głębokość. Pojawia się wtedy problem roztopienia lancy. Można temu częściowo zapobiegać pokrywając lance materiałami żaroodpornymi lub stosując lance przystosowane do tego celu oferowane przez producentów zagranicznych. Drugi bardzo niekorzystny aspekt wdmuchiwania w piecach indukcyjnych, to pryskanie metalu. Przy pełnym piecu kąpiel metalowa znajduje się kilkadziesiąt centymetrów od pokrywy pieca, co przy intensywnym wdmuchiwaniu powoduje znaczne rozpryski metalu na pokrywę lub podest pieca. W piecach indukcyjnych sieciowej i średniej częstotliwości o dwóch zakresach pracy występuje bardzo intensywny ruch ciekłego metalu i dobre mieszanie kąpieli metalowej. Umożliwia to uzyskanie bardzo wysokich efektywności nawęglania w przypadku dodania nawęglacza do stałego wsadu lub późniejsze jego narzucenie na powierzchnię ciekłego metalu.

Uzyskane w czasie realizacji badań doświadczenia wykazały, że zastosowanie jako gazu nośnego argonu lub azotu powoduje, że proces wdmuchiwania przebiega znacznie bardziej „spokojnie”. Wpływają na to: brak tlenu w gazie nośnym oraz brak zanieczyszczeń wodnych i olejowych. Oznacza to iż w piecach indukcyjnych możliwe jest prowadzenie procesu pneumatycznego dowęglania.

Przy wdmuchiwaniu do pieców indukcyjnych należy zastosować małe natężenia przepływu gazu i materiału. Ograniczy to w znacznym stopniu pryskanie metalu, a głębokie zanurzenie lancy wydłuży czas kontaktu sproszkowanego grafitu z ciekłym metalem i uzyskane w ten sposób efektywności mogą osiągać wartości nawet powyżej 80 %.

10. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych należy stwierdzić, że możliwe jest prowadzenie wytopów żeliwa wyłącznie na bazie złomu stalowego i jego pneumatyczne nawęglanie do żądanej zawartości. Spowoduje to konieczność wprowadzenia w zależności od wielkości pieca od kilkudziesięciu do kilkuset kilogramów nawęglacza. Jest to możliwe do uzyskania, ale spowoduje to znaczny spadek temperatury i proces należy prowadzić dwuetapowo, co wydłuży czas wytopu. Poza tym stopienie wsadu o bardzo niskiej zawartości węgla wymaga wysokich temperatur (topienie staliwa). Z praktycznego punktu widzenia i na podstawie uzyskanych doświadczeń najbardziej korzystne jest takie dobranie materiałów wsadowych, aby uzyskać stop przed procesem pneumatycznego nawęglania o zawartości węgla powyżej 2%. Można to zrobić stosując jako wsad złom stalowy lub złom stalowy i obiegowy oraz nawęglacz dodawany do stałego wsadu. Następnie po

roztopieniu i wykonaniu analizy chemicznej uzupełnić niedobór węgla poprzez pneumatyczne wdmuchiwanie.

W piecach elektrycznych łukowych lancę należy wprowadzać tuż pod powierzchnię ciekłego metalu pod kątem 30 – 40%. Zbyt głębokie zanurzenie lancy powoduje jej termiczne zużycie. Natomiast wdmuchiwanie materiału grafitowego o dużej zawartości pyłów lancą niezanurzoną, powodować będzie ich odciąganie przez urządzenia odpylające oraz pozostawanie części nawęglacza na powierzchni ciekłego metalu, co znacznie obniży efektywność procesu.

W omawianym zakresie badawczym Zakład Odlewnictwa IMiB Politechniki Śląskiej współpracuje z producentem urządzeń do pneumatycznego nawęglania Kooperacją POLKO z Mikołowa.

LITERATURA

- [1] Janerka K. i in.: Aspekty technologiczne i konstrukcyjne nawęglania stopów żelaza metodą wdmuchiwania w piecach elektrycznych łukowych, *Acta Metallurgica Slovaca*, 2001, vol. 7, t. 2, s. 20-25
- [2] Janerka K., Bartocha D.: Pneumatyczne nawęglanie przy produkcji żeliwa syntetycznego. *Mat. Konf. SPOLUPRACA 2004*, Tatranska Lomnica, Słowacja.
- [3] Janerka K. i in.: Technologia nawęglania ciekłych stopów żelaza metodą pneumatycznego wdmuchiwania. *Archiwum Odlewnictwa, PAN Katowice*, vol 4, nr 13, str. 115-120.
- [4] Bartocha D., Janerka K., Suchoń J. Materiały wsadowe i technologia wytopu a struktura żeliwa szarego, *Archiwum Odlewnictwa, PAN Katowice*, vol 4, nr 14, str. 29-39.
- [5] Kanafek M, Homa D, Janerka K.: Nawęglanie żeliwa w Odlewni TEKSID Poland S. A. za pomocą urządzenia pneumatycznego POLKO, *Przegląd Odlewnictwa*, 1999, nr 7
- [6] Babiarz W., Homa D., Janerka K. i in.: Nawęglanie stopów żelaza urządzeniami systemu POLKO w ABB Zamech Ltd., *Przegląd Odlewnictwa*, 1997, nr 12, s. 414.
- [7] Farias L. R., Robertson D. G. C.: Physical modeling of gas – powder injection into liquid metals, *Elektric Furnance Conf. Proc. Dallas 1986 r.*
- [8] Farias L. R., Irons G. A.: A unified approach to bubbling-jeting phenomena in powder injection into iron and steel, *Metallurgical Transaction B*, nr 6, 1990
- [9] Janerka K. i in.: Analiza strumienia dwufazowego w procesie wdmuchiwania proszków, *Archiwum Odlewnictwa*, 2001, vol 1, nr 2/2, s. 489-494
- [10] Janerka K., Jezierski J.: Obraz strumienia dwufazowego w procesie wdmuchiwania proszków do ciecży, *Archiwum Odlewnictwa*, 2002, vol. 2, nr 5, s. 74-79

**THE FACTORS EFFECTS ON THE PNEUMATIC RECARBURIZATION
PROCESS PARAMETERS**

SUMMARY

In the article have been presented the effect of pneumatic parameters recarburization parameters on the ratio and efficiency of the process and the liquid metal temperature decreasing. The analysis include a device selection, its work parameters, temperature and chemical composition of the liquid metal and the type of carburizer. There have been presented the hypothetical view of the diphasic stream introduced into liquid medium on the basis of made model experiments.

Recenzował Prof. Jan Szajnar