

SZYBKOŚĆ PROCESU W PNEUMATYCZNYM NAWĘGLANIU CIEKŁYCH STOPÓW ŻELAZA

K. JANERKA¹, S. JURA², Z. PIĄTKIEWICZ³, J. JEZIELSKI⁴, H. SZLUMCZYK⁵
Katedra Odlewnictwa Wydziału Mechanicznego Technologicznego
Politechniki Śląskiej,

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono mechanizm nawęglania ciekłego metalu przy pneumatycznym wprowadzaniu sproszkowanego grafitu do kąpieli metalowej. Podjęto również próbę obliczenia szybkości nawęglania w zależności od parametrów strumienia dwufazowego.

1. WPROWADZENIE.

Wdmuchiwanie sproszkowanych materiałów do ciekłego metalu jest technologią znaną od wielu lat. Rozdrobniony reagent pozwala na uzyskanie dużej powierzchni styku reagujących faz (proszek – ciekły metal). Dodatkowo gaz nośny wymusza ruch ciekłego metalu, ujednorodniając jego skład chemiczny w całej objętości. Te czynniki powodują, iż prowadzone procesy metalurgiczne (nawęglanie, odsiarczanie, wprowadzanie dodatków stopowych) cechują się dużą szybkością przebiegu reakcji i bardzo wysokim stopniem przyswojenia poszczególnych pierwiastków przez ciekły metal.

Jednym z problemów przy wytopie żeliwa w piecach elektrycznych łukowych jest uzyskanie odpowiedniej zawartości węgla w ciekłym metalu. Jest to zagadnienie bardzo istotne w wielu nowoczesnych odlewniach, podchodzących racjonalnie i ekonomicznie do prowadzonej produkcji, które zrezygnowały z udziału surówki we wsadzie, ze względu na jej wysoką cenę. Powstały w ten sposób niedobór węgla

¹ Dr inż., e-mail: janerka@zeus.polsl.gliwice.pl

² Prof. zw. dr hab.inż. e-mail: sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl

³ Prof. zw. dr.inż.

⁴ Mgr inż. e-mail: georgeko@zeus.polsl.gliwice.pl

⁵ Dr inż. e-mail: sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl

próbuje się korygować metodami tradycyjnymi (dodawanie nawęglacza do wsadu i późniejsze uzupełnianie w końcowym etapie wytopu, poprzez narzucanie na powierzchnię). Są to jednak metody czasochłonne i mało efektywne.

2. SZYBKOŚĆ NAWĘGLANIA

Analizując przebieg reakcji metalurgicznych konieczne jest rozpatrzenie szybkości przebiegu reakcji w celu określenia czasu dochodzenia układu w pobliże stanu równowagi lub przynajmniej w celu poznania czynników, które mogą sprzyjać jego przyspieszeniu. Przy obecnej znajomości bardzo skomplikowanego rzeczywistego przebiegu reakcji często jest możliwe tylko ustalenie czynników, które powodują jej przyspieszenie.

Nawęglanie jest procesem rozpuszczania węgla ze stałego nawęglacza w ciekłym żelazie. Jest więc procesem heterogenicznym, który składa się z etapów następujących po sobie w określonej kolejności a mianowicie [1]:

- wydzielanie węgla z nawęglacza i powstawanie granicznej warstwy przy powierzchni nawęglacza,
- dyfuzyjne przemieszczanie węgla poprzez warstwę graniczną przyległą do nawęglacza,
- doprowadzenie węgla wgłąb ciekłego metalu.

Decydujący wpływ na szybkość rozpuszczania w układzie heterogenicznym ma szybkość najpowolniejszego procesu, którym w rozpatrywanym przypadku jest dyfuzja węgla poprzez graniczną warstwę przyległą do nawęglacza.

Rozważając przebieg zjawisk wymiany składników między dwoma fazami wykorzystuje się często model warstw granicznych Nernsta. W wielu opracowaniach cytuje się wzór obrazujący wpływ niektórych czynników na szybkość zmiany stężenia składników reagujących faz [2]

$$\frac{dC}{dt} = \frac{D_c}{\delta} \cdot \frac{F}{V} (C_{\max} - C) = k_c (C_{\max} - C) \quad (1)$$

gdzie: C - stężenie węgla w ciekłym metalu w %, C_{\max} - stężenie węgla odpowiadające stanowi nasycenia w danych warunkach w %, D_c - współczynnik dyfuzji w $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, F - powierzchnia styku faz w m^2 , V - objętość fazy, w której zachodzi zmiana zawartości składnika w m^3 , δ - grubość przypowierzchniowej warstwy dyfuzyjnej w m, k_c - współczynnik wymiany masy między nawęglaczem a nawęglanym metalem (stała nawęglania).

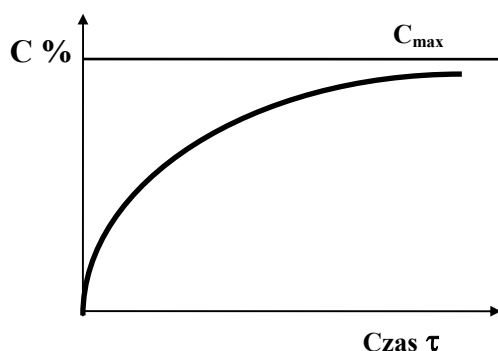
W prowadzonej analizie teoretycznej procesu nawęglania [3, 4] wykazano, że w miejsce stężeń molowych można z dużym przybliżeniem stosować stężenia wagowe. Całkując równanie (1) otrzymano wzór:

$$C = C_{\max} [1 - \exp(-k_c \tau)] \quad (2)$$

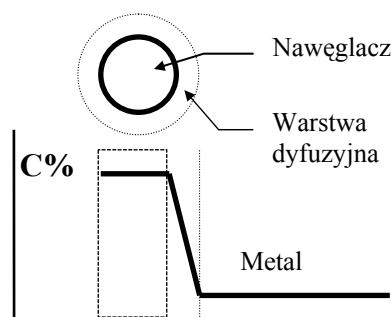
Wykresem zależności równania (2) jest krzywa wykładnicza przedstawioną na rys.1. Jak widać z wykresu, nawęglanie stopu żelaza przebiega początkowo szybko, a następnie w miarę wzrastania stężenia węgla w stopie, prędkość nawęglania maleje, ustając

praktycznie po przekroczeniu długiego czasu. Na rys. 2 przedstawiono również profil stężenia węgla w ciekłym metalu.

Jeżeli nawęglanie przebiega w warunkach zapewniających niezmienną wartość współczynnika k_c w czasie to prędkość nawęglania stopu w danym momencie jest tym większa im większe jest stężenie nasycenia C_{max} , które w technicznych stopach żelaza z węglem maleje z obniżaniem temperatury, ze wzrostem zawartości krzemu i fosforu. Prędkość nawęglania rośnie ze wzrostem wartości współczynnika k_c . W przypadku gdy nawęglacz zawiera większą ilość popiołu i nawęglanie odbywa się w warunkach uniemożliwiających jego usuwanie z powierzchni nawęglacza, wówczas w miarę rozpuszczania się węgla zmniejsza



Rys. 1. Krzywa nawęglania
Fig. 1. Recarburisation curve



Rys. 2. Profil stężenia węgla w metalu
Fig. 2. Carbon concentration profile in metal

się powierzchni nawęglacza czystego, wskutek jego zużywania się. Decydujący wpływ na ten współczynnik posiada stosunek powierzchni styku faz - między którymi zachodzi wymiana składników - do ich objętości (F/V). Zmieniając ten stosunek, można w istotny sposób przyspieszać przebieg reakcji. Jednocześnie widać, że mała jego wartość może wywierać hamujący wpływ na wymianę składników. Przyjmując, że zmniejszenie powierzchni międzyfazowej odbywa się według krzywej wykładniczej, można napisać [1]:

$$F = F_o \exp(-a\tau) \quad (4)$$

gdzie: F - powierzchnia międzyfazowa w m^2 , F_o - powierzchnia międzyfazowa w momencie rozpoczęcia nawęglania w m^2 , a - współczynnik, będący miarą prędkości zmiany powierzchni międzyfazowej w s^{-1} , τ - czas nawęglania w s.

Zastosowanie metod, w których zwiększa się stosunek powierzchni styku do objętości roztworu (do takich należy bez wątpienia metoda wdmuchiwania sproszkowanych materiałów do ciekłego metalu) pozwala na istotne zwiększenie szybkości przebiegu reakcji metalurgicznych.

Analizując wzór (1), można zauważyć, że na szybkość zachodzenia reakcji mają również wpływ dalsze czynniki: szybkość dyfuzji i grubość przypowierzchniowej warstwy dyfuzyjnej.

Szybkości dyfuzji składników ciekłych faz są małe, a drogi dyfuzji często dość znaczne. Możliwości przyspieszenia dyfuzji przez zmianę temperatury, ze względu na ograniczony zakres zmian temperatur procesów metalurgicznych, są nieznaczne. Można natomiast dążyć do zmniejszenia dróg dyfuzji przez nadanie ruchu ciekłej fazie, w której i między którą przebiega wymiana składników (rys. 2. - warstwa dyfuzyjna). Doprowadzenie reagujących składników w sąsiedztwo granic faz i odprowadzenie produktów reakcji z miejsca jej przebiegu odgrywają istotną rolę w szybkości całego procesu.

Stosując wymuszony ruch ciekłego metalu można więc w wyraźny sposób wpłynąć na przyspieszenie przebiegu reakcji metalurgicznych.

3. STRUMIEŃ DWUFAZOWY W OŚRODKU CIEKŁYM

Obserwując strumień gazu lub mieszaniny gazu z proszkiem wprowadzanym do kąpieli metalowej wyróżnia się dwa stany przepływu: barbotaż i przepływ strumieniowy. Pierwszy jest charakterystyczny dla małych natężeń przepływów 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 dużych 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 z 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.

Do analizy strumienia Kimura wprowadził liczbę strumienia N_J , wyrażoną zależnością [4]:

$$N_J = 1,5 \frac{m_c w^2 \rho_g}{m_g w_c d_c \rho_l} \quad (5)$$

m_c - masowe natężenie przepływu proszku [kg/s], m_g - masowe natężenie przepływu gazu [kg/s], d_c – średnica wdmuchiwanej cząstki [m], ρ_g – gęstość gazu na wylocie z lancy [kg/m³], ρ_l – gęstość ciekłego metalu [kg/m³], w , w_c – odpowiednio prędkość gazu i cząstek na wylocie z lancy [m/s]

Liczbę tą przyjęto w pracy z uwagi na fakt iż oprócz natężeń przepływu gazu i materiału oraz gęstości zawiera ona prędkość wdmuchiwanego strumienia oraz średnicę

zastępczą cząstek. Są to istotne wskaźniki mające wpływ na przebieg procesu nawęglania. Przyjęto dla wartości liczby N_J poniżej 1000 barbotaż (w zakresie tym obserwowano podczas badań zjawisko kawitacji powodujące nieciągłość strumienia), natomiast gdy $N_J > 1500$, jednolity strumień zapewnia dużą penetrację w głąb kąpieli metalowej. Zakres wartości $1000 < N_J < 1500$ opisuje jako stan przejściowy.

Jak opisano wyżej, z praktycznego punktu widzenia określenie wartości tych liczb jest uciążliwe ze względu na zawarte w niej czynniki takie jak: gęstość gazu i metalu, oraz wskaźnik wielkości pęcherzy. Biorąc pod uwagę fakt, iż gęstości ciekłego żeliwa i powietrza, które jest stosowane w procesie nawęglania zmieniają się nieznacznie, uproszczono powyższe zależności do postaci [5]:

$$N_{JAN} = 3,697 \cdot 10^{-4} \frac{m_c w}{m_g d_c} \quad (6)$$

4. WSKAŹNIKI NAWĘGLANIA

Istotnymi wskaźnikami charakteryzującymi proces nawęglania jest efektywność i szybkość nawęglania. Dają nam one pełen obraz możliwości tego procesu.

efektywność nawęglania:

$$E = m_m \frac{(C_k - C_p)}{m \cdot C_x} \quad [\%] \quad (7)$$

C_p – zawartość węgla na początku procesu [%]

C_k – zawartość węgla na końcu procesu [%]

m_m – masa metalu [Mg]

m – masa porcji materiału nawęglającego [Mg]

C_x – zawartość węgla w materiale nawęglającym

szybkość nawęglania:

$$S = \frac{(C_k - C_p)}{t} \quad \left[\frac{\%C}{s} \right] \quad (8)$$

t – czas nawęglania [s]

Z uwagi na fakt, że proces badawczy prowadzono na jednostkach piecowych o różnych pojemnościach, wprowadzono masową szybkość nawęglania (S_M).

$$S_M = \frac{m_m (C_k - C_p)}{100 \cdot t} \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (9)$$

Zdaniem autorów pozwala to na porównanie i analizę uzyskanych wartości dla różnej masy ciekłego metalu.

5. WYNIKI POMIARÓW I OBLICZEŃ.

Cykl badawczy polegał na przeprowadzeniu kilkudziesięciu eksperymentów w warunkach przemysłowych [5, 6, 7]. Część z uzyskanych wyników obliczeń charakteryzujących strumień dwufazowy i ciekły metal przedstawiono w poniższej tabeli.

Tabela 1. Wyniki obliczeń parametrów strumienia dwufazowego i ciekłego metalu
Table 1. Calculation results for diphas stream and liquid metal parameters

Lp	m_g	m_c	N_J	N_{JJAN}	E	S	S_M
1	0.096	0.302	807	772	87.9	0.0042	0.021
2	0.097	0.300	639	593	92.7	0.0025	0.017
3	0.082	0.514	1103	1043	99.4	0.0057	0.032
4	0.082	0.300	806	774	94.3	0.0050	0.028
5	0.083	0.235	500	479	86.0	0.0020	0.012
6	0.059	1.476	1455	1508	99.7	0.0051	0.147
7	0.062	1.250	1246	1282	93.1	0.0036	0.116
8	0.055	1.818	1803	1925	91.7	0.0055	0.166
9	0.053	2.083	2080	2243	89.5	0.0061	0.186
10	0.054	1.923	1922	2039	89.9	0.0056	0.173

6. ANALIZA WYNIKÓW EKSPERYMENTÓW

Efektywność i szybkość nawęglania.

W przeprowadzonych eksperymentach, których wyniki były przedmiotem analizy w niniejszej pracy uzyskano bardzo wysokie efektywności i szybkości nawęglania. Efektywność zmieniała się w zakresie od 60÷99 %, natomiast szybkość od 0,0012÷0,0063 %C/s. Rozpiętość uzyskanych wyników jest tak duża, ponieważ w prowadzonych eksperymentach 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, wynikającego z potrzeb danej odlewni.

Parametry strumienia dwufazowego.

W przeprowadzonych eksperymentach współczynnik strumienia dwufazowego zmieniał się w następujących zakresach $N_J = 502 \div 2182$ a $N_{JJAN} = 494 - 2395$

W ramach analizy statystycznej przeprowadzono wpływ wielkości strumienia dwufazowego wraz z parametrami pneumatycznego przemieszczania na szybkość i efektywność procesu nawęglania. Przeprowadzono analizy statystyczne z uwzględnieniem różnych parametrów procesu wdmuchiwania proszków. Wyniki tych analiz przedstawiają się następująco:

$$S = 1,4 \cdot 10^{-3} + 1,8 \cdot 10^{-6} N_{JJAN} \quad (10)$$

o parametrach statystycznych:

$$F = 83,11 \quad S = 23,8 \quad W = 2,7 \quad R = 0,79 \quad SY = 0,0035 \quad [\%C/s]$$

F – test Fishera, W – test wiarygodności dla zbioru i funkcji, R – współczynnik korelacji, S – odchylenie standardowe, SY – wartość średnia

$$S_M = -0,37 + 2,4 \cdot 10^{-4} N_{JJAN} \quad (11)$$

o parametrach statystycznych:

$$F = 330 \quad S = 30 \quad W = 7,72 \quad R = 0,93 \quad SY = 0,68 \quad [kg/s]$$

$$S = 1,1 \cdot 10^{-2} + 1,8 \cdot 10^{-6} N_{JJAN} + 4,8 \cdot 10^{-4} \frac{1}{C_p} \quad (12)$$

o parametrach statystycznych:

$$F = 49,4 \quad S = 26,2 \quad W = 2,8 \quad R = 0,82 \quad SY = 0,0035 \quad [\%C/s]$$

$$S_M = -0,22 + 8,9 \cdot 10^{-4} N_{JJAN} + 23 \frac{1}{C_p} \quad (13)$$

o parametrach statystycznych:

$$F = 146,2 \quad S = 24,2 \quad W = 6,65 \quad R = 0,92 \quad SY = 0,0673 \quad [kg/s]$$

Zakres zmienności i przedstawione powyżej równania statystyczne pokazują, że można do obliczeń wskaźników nawęglania w miejsce współczynnika strumienia N_j , wprowadzić zmodyfikowane współczynnik N_{JJAN} uzyskując zbliżone wartości parametrów statystycznych.

Przedstawione powyżej zależności pokazują, iż przy wprowadzeniu „masowej” 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. Z uzyskanych zależności wynika, iż przy wzroście współczynnika strumienia wzrasta szybkość nawęglania, co potwierdza wstępne hipotezy, iż wzrost dynamiki strumienia powoduje zwiększenie tego wskaźnika nawęglania.

7. PODSUMOWANIE

Zagadnienia wdmuchiwania proszków do ciekłego metalu realizowane są w Katedrze Odlewnictwa Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej od wielu lat. Nawęglanie ciekłego metalu metodą pneumatyczną zostało wprowadzone w kilkunastu odlewniach krajowych. Stwarza to bazę do prowadzenia eksperymentów nie tylko w zakresie wpływu parametrów strumienia dwufazowego na szybkość i efektywność procesu, ale również w aspekcie jakości uzyskiwanych stopów. Drugim ważnym kierunkiem badań wdmuchiwania sproszkowanych cząstek w

strumieniu gazu nośnego jest wprowadzanie dodatków stopowych do ciekłego metalu [8]. Ich celem jest zwiększenie stopnia przyswojenia i intensyfikacja wprowadzania tych dodatków. Kolejny obszar działalności polega na wytwarzaniu kompozytów na osnowie aluminium, poprzez wprowadzanie dyspersoidu do osnowy metalowej [9]. Prowadzone są również badania modelowe umożliwiające obserwację strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym

LITERATURA

- [1]. Tochowicz S.: Biblioteka Metalurga - *Wytapianie stali w piecach elektrycznych*, Wyd. Śląsk, 1988r.
- [2]. Krzeszewski R.: *Kinetyka rozpuszczania węgla w ciekłym żelazie*, Prace Inst. Odl., nr 1-3, Kraków 1963.
- [3]. Podrzucki Cz, Kalata Cz. : *Metalurgia i odlewnictwo żeliwa*, Wyd. Śląsk, 1971.
- [4]. 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
- [5]. Janerka K.: *Nawęglanie ciekłych stopów żelaza za pomocą urządzeń pneumatycznych*, Praca doktorska, Gliwice 195.
- [6]. Janerka K., Jura S., Piątkiewicz Z, Szlumczyk H, Jezierski J.: *Szybkość nawęglania w funkcji parametrów strumienia dwufazowego w pneumatycznym nawęglaniu ciekłych stopów żelaza*, Krzepnięcie metali i stopów, v.1, nr. 39, PAN 1998r.
- [7]. Piątkiewicz Z, Jura S., Janerka K. i inni: *Sprawozdanie z pracy badawczej BW-RMT-3/1999*, Niepublikowane.
- [8]. Jezierski J., Janerka K., Jura S., Piątkiewicz Z.: „*Parametry wdmuchiwania żelazostopów do ciekłych stopów żelaza*”, Krzepnięcie metali i stopów, v.1, nr. 39, PAN 1999r.
- [9]. Gawroński J., Janerka K., Cholewa M., Szajnar J.: „*Modelowanie pneumatycznego wprowadzania cząstek zbrojących do osnowy kompozytu*”, Acta Metallurgica Slovaca, v.5, 1999r,

RATE OF THE PROCESS IN PNEUMATIC LIQUID CAST IRON CARBURIZING

SUMMARY

The article presents a mechanism of the liquid metal recarburisation with application of a pneumatic method of a powdered graphite injection into the liquid metal. There were undertaken trials of the recarburisation rate calculation in relation to a diphas stream parameters.

Reviewed by prof. Józef Gawroński