9/5

Archives of Foundry, Year 2002, Volume 2, № 5 Archiwum Odlewnictwa, Rok 2002, Rocznik 2, Nr 5 PAN – Katowice PL IS SN 1642-5308

# OBRAZ STRUMIENIA DWUFAZOWEGO W PROCESIE WDMUCHIWANIA PROSZKÓW DO CIECZY

K. JANERKA<sup>1</sup>, J. JEZIERSKI<sup>2</sup> Katedra Odlewnictwa, Wydział Mechaniczny Technologiczny Politechniki Śląskiej. ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice

#### STRESZCZENIE

W artykule podjęto próbę opisu strumienia dwufazowego wprowadzanego do ośrodka ciekłego. Analiza została wykonana pod kątem procesu wymiany masy przy nawęglaniu ciekłych stopów żelaza metodą pneumatyczną. Szczególną uwagę zwrócono na zachowanie cząstek i pęcherzy gazowych w poszczególnych obszarach strumienia.

Key words: liquid metal, injection, carburization, diphase stream, physical modeling.

#### 1. WPROWADZENIE

Wdmuchiwanie sproszkowanych materiałów do ciekłego metalu polega na wprowadzeniu określonych reagentów w strumieniu gazu nośnego jakim może być powietrze, argon lub azot. Nie ulega wątpliwości, iż metoda ta znacznie intensyfikuje prowadzone procesy metalurgiczne, skracając ich czas i zwiększając stopień przyswojenia danego pierwiastka. Autorzy od wielu lat zajmują się procesem nawęglania ciekłych stopów żelaza metodą pneumatyczną. W tym okresie zostało przeprowadzonych szereg eksperymentów nawęglania w warunkach laboratoryjnych i przemysłowych. Realizowane są również badania modelowe mające na celu wyjaśnienie procesu wymiany masy oraz oddziaływania poszczególnych parametrów charakteryzujących pneumatyczne przemieszczanie i ośrodek ciekły do którego wprowadzany jest strumień. Niniejszy artykuł stanowi próbę przedstawienia strumienia dwufazowego wprowadzanego do cieczy. Podstawą tych obserwacji są wyniki badań modelowania fizycznego realizowane w Katedrze Odlewnictwa.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> dr inż., janerka@zeus.polsl.gliwice.pl

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> mgr inż. georgeko@zeus.polsl.gliwice.pl

### 2. CZYNNIKI CHARAKTERYZUJĄCE PNEUMATYCZNE NAWĘGLANIE

Analizując proces wdmuchiwania nawęglacza do ciekłego metalu można w nim wyróżnić trzy podstawowe czynniki: parametry pneumatycznego przemieszczania, ciekły metal oraz materiał nawęglający. Na większość z nich mamy możliwość oddziaływania, co pozwala na sterowanie procesem, umożliwiając zachowanie wysokiej powtarzalności.

Do podstawowych wskaźników charakteryzujących pneumatyczne przemieszczanie należy natężenie przepływu gazu (mg), oraz natężenie przepływu materiału (mc). Ich konsekwencją jest określona prędkość gazu (w) i cząstki (wc) oraz stężenie mieszaniny ( $\mu$ ) na wylocie z lancy. Wdmuchiwanie materiału w strumieniu gazu wiąże się również ze składem chemicznym danego nośnika (w powietrzu zawarty jest tlen) i jego wilgotnością.

Drugim ważnym czynnikiem decydującym o skuteczności metody jest ciekły metal. W tym przypadku najważniejszymi parametrami są: początkowa zawartość węgla w stopie ( $C_p$ ) oraz temperatura ( $T_p$ ). Zmianie mogą również ulegać lepkość ( $v_1$ ) i gęstość ( $\rho_1$ ).

Trzeci czynnik to materiał nawęglający. Może on posiadać różną średnicę ziaren (d<sub>c</sub>), gęstość ( $\rho_c$ ) oraz zawartość węgla (C<sub>nn</sub>).

Podsumowując te czynniki można zapisać szybkość procesu nawęglania (S) w funkcji:

$$S = f (m_g, m_c, w, w_c, \mu, C_p, T_p, v_l, \rho_l, d_c, \rho_c, C_{mn})$$

Większość z nich ma bezpośredni wpływ na zasięg i kształt strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym. Celem autorów jest poszukiwanie odpowiedzi na pytanie w jakim stopniu decydują poszczególne czynniki na skuteczność realizowanego procesu.

## 3. STRUMIEŃ DWUFAZOWY W OŚRODKU CIEKŁYM

Opis strumienia dwufazowego został dokonany na podstawie realizowanych w Katedrze Odlewnictwa badań modelowych [1, 2, 5]. Eksperymenty prowadzono dla określonego zakresu zmienności parametrów pneumatycznego przemieszczania oraz proszków o różnej gęstości i średnicy ziaren. Należy zaznaczyć, że zrealizowano tylko część zamierzonego planu badawczego i na obecnym etapie trudno jest w niektórych przypadkach określić co w danej sytuacji ma decydujące znaczenie. Na rys.1a przedstawiono wprowadzanie polistyrenu niespienionego (średnica zastępcza cząstek d<sub>c</sub>=0,095 mm, gęstość usypowa  $\rho_c = 1651 \text{ kg/m}^3$ , prędkość w= 23,4 m/s i stężenie mieszaniny  $\mu$ =35,8 kg/kg) w strumieniu powietrza do wody. Rys. 1 b uzyskano przy wdmuchiwaniu polistyrenu spienionego (d<sub>c</sub>=0,906 mm,  $\rho_c = 524 \text{ kg/m}^3$ , w= 47,2 m/s i  $\mu$ =12,6 kg/kg).



Rys. 1. Obraz strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym. a – wdmuchiwanie polistyrenu niespienionego przy prędkości w = 23,4 m/s, b – wdmuchiwanie polistyrenu spienionego przy prędkości w = 47,2 m/s

Fig. 1. Diphase stream pattern in liquid. a) non-expanded polystyrene injection, velocity w = 23, 4 m/s, b) expanded polystyrene injection, , velocity w = 47,2 m/s.

Na rys 2. przedstawiono hipotetyczny obraz strumienia dwufazowego. Wyróżnić w nim można pewne charakterystyczne strefy. Strefa I – bezpośrednio u wylotu 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, 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 skutek ruchu metalu i pływających na powierzchni ziaren nawęglacza. Jest to zjawisko niekorzystne i można je minimalizować zwiększając prędkość gazu na wylocie z lancy.



Rys. 2. Kształt i obszary strumienia dwufazowego, 1 – cząstki nawęglacza, 2 –pęcherze gazowe.

Fig. 2. A shape and the diphase stream areas: a) a particle in liquid, b) a bubble in liquid

Strefa II to obszar bezpośredniego zasięgu strumienia. Składa się ona przede wszystkim z czastek materiału naweglającego, gdyż tylko one posiadają na tyle dużą energie aby przeniknąć do ciekłego metalu na taką odległość. Porównując wielkość tych stref na rys. la i lb można zauważyć różnice zarówno w długości jak i kształcie. Aby jednoznacznie odpowiedzieć na pytanie co ma decydujący wpływ na obraz tej strefy należy przeprowadzić dodatkowe eksperymenty przy uwzględnieniu zmian prędkości gazu i stężenia masowego mieszaniny oraz wielkości i gęstości cząstki. Należy przypuszczać iż proces wymiany masy będzie w tej strefie najbardziej intensywny. Strefa III to obszar cząstek mających bezpośredni kontakt z ciekłym metalem. Jego powierzchnia będzie największa i należy przypuszczać, że decyduje on o skuteczności procesu. Wielkość tego obszaru jest konsekwencją powstawania strefy II, stąd tak jak poprzednio wymaga on dodatkowych badań. Strefa IV to pecherze gazowe o kształcie kuli, elipsoidy lub czaszy kulistej. Zależne to bedzie od miejsca powstania pecherza i jego wielkości. Z pewnością 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.

## 4. SZYBKOŚĆ PROCESU

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 [3, 4]

$$\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t} = \frac{D_c}{\delta} \cdot \frac{F}{V} (C_{\mathrm{max}} - C) = k_c (C_{\mathrm{max}} - C) \tag{1}$$

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

Jeżeli nawęglanie przebiega w warunkach zapewniających niezmienność 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 się powierzchnia nawęglacza czystego, wskutek jego zużywania się.



Rys. 3. Profil stężenia węgla w metalu Fig. 3. Carbon concentration profile in metal

Analizując wzór (1), można zauważyć, że na szybkość 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. Przy wdmuchiwaniu proszków wymusza się ruch ciekłego metalu, przez co zmniejsza się drogi dyfuzji w fazie, w której i między którą przebiega wymiana składników (rys. 3. - warstwa

dyfuzyjna). Doprowadzenie reagujących składników w sąsiedztwo granic faz i odprowadzenie produktów reakcji z miejsca jej przebiegu odgrywają istotną rolę w szybkości całego procesu.

Duże znaczenie dla transportu materiałów w ciekłym metalu mają również zjawiska konwekcji. Dzięki nim przemieszczanie materiałów odbywa się wielokrotnie szybciej niż za pomocą dyfuzji. Chociaż ostatni etap ruchu przez graniczną warstwę przypowierzchniową odbywa się zgodnie z prawami dyfuzji, to jednak intensywność ruchu ciekłej fazy wywiera istotny wpływ na grubość tej warstwy. W miarę wzrostu szybkości ruchu grubość dyfuzyjnej warstwy przypowierzchniowej wyraźnie maleje. Jest ona funkcją szybkości ruchu ciekłej fazy i jej lepkości kinematycznej. Stąd konieczność poznania obszarów strumienia oraz uchu cząstek i pęcherzy.

Obliczenia współczynnika wymiany masy można prowadzić stosując liczby bezwymiarowe Fouriera, Schmidta, Sherwooda, Grashofa, Pécleta, Stantona. Jednak taka analiza zostanie przeprowadzona po zakończeniu założonego etapu badań.

#### LITERATURA

- K. Janerka, J. Gawroński, H. Szlumczyk, J. Jezierski.: Strumień dwufazowy w procesie wdmuchiwania proszków do ośrodka ciekłego "Transport Pneumatyczny TP 2002" – Materiały VIII Miedz. Konf., Gliwice 2002.
- [2] K. Janerka, S. Jura, J. Jezierski, H. Szlumczyk.: Analiza strumienia dwufazowego w procesie wdmuchiwania proszków, Archiwum Odlewnictwa, nr 2, 2001.
- [3] Tochowicz S.: Biblioteka Metalurga Wytapianie stali w piecach elektrycznych, Wyd. Śląsk, 1988r.
- [4] Krzeszewski R.: Kinetyka rozpuszczania węgla w ciekłym żelazie, Prace Inst. Odl., nr 1-3, Kraków 1963.
- [5] Gawroński J., Janerka K., Cholewa M., Szajnar J.: "Modelowanie pneumatycznego wprowadzania cząstek zbrojących do osnowy kompozytu", Acta Metallurgica Slovaca, v.5, 1999r,

## DIPHASE STREAM PATTERN IN POWDER INJECTION PROCESS INTO LIQUID

#### SUMMARY

In the article have been made an attempt to describe of diphase stream introduced into liquid. The analysis have been made from the point of view of mass transfer in recarburization of liquid ferroalloys with the help of pneumatic method. There have been paid attention to particles and bubbles behavior in individual stream areas.

Recenzował Prof. Stanisław Jura