



POLISH ACADEMY OF SCIENCES - COMMITTEE OF MATERIALS SCIENCE
SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY OF GLIWICE
INSTITUTE OF ENGINEERING MATERIALS AND BIOMATERIALS
ASSOCIATION OF ALUMNI OF SILESIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Conference
Proceedings

12th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE

ACHIEVEMENTS IN MECHANICAL & MATERIALS ENGINEERING

Mechanizm wymiany masy w procesie pneumatycznego nawęglania ciekłych stopów żelaza

K. Janerka

Zakład Odlewnictwa Instytutu Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej, 44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7, Polska

W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące pneumatycznego nawęglania ciekłych stopów żelaza w piecach elektrycznych łukowych. Omówiono mechanizm przebiegu procesu nawęglania oraz zasięg i kształt strumienia dwufazowego wprowadzanego do ośrodka ciekłego.

1. WPROWADZENIE.

Nowoczesne metody produkcji stopów żelaza to obecnie nie tylko przetapianie złomu stalowego lub surówki i uzupełnianie składu chemicznego żelazostopami. Poszukuje się ciągle nowych i udoskonala znane już materiały, wprowadza się szereg rozwiązań intensyfikujących przebieg procesów metalurgicznych, dążąc jednocześnie do obniżenia kosztów wytwarzania. Do takich metod należy niewątpliwie wdmuchiwanie sproszkowanych materiałów w strumieniu gazu nośnego do kąpieli metalowej. Rozdrobniony reagent w połączeniu z mieszanym ciekłym metalem przez gaz nośny powoduje, że uzyskuje się prędkości przebiegu procesu i stopień przyswojenia wdmuchiwanym cząstkom nieosiągalny metodami tradycyjnymi. Metoda ta znalazła zastosowanie do nawęglania ciekłych stopów żelaza w piecach elektrycznych łukowych oraz wprowadzania modyfikatorów przy zalewaniu form.

W Zakładzie Odlewnictwa prowadzone są od kilku lat badania w zakresie nawęglania ciekłych stopów żelaza metodą pneumatyczną [1]. Obejmują one eksperymenty w warunkach laboratoryjnych, które przyczyniły się do wielu zastosowań przemysłowych [2, 3] jak również badania modelowe mające na celu wyjaśnienie zjawisk zachodzących przy wprowadzaniu strumienia dwufazowego do kąpieli metalowej [4, 5].

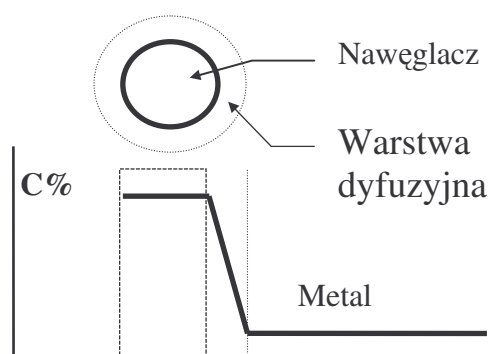
2. SZYBKOŚĆ NAWĘGLANIA

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 [6]:

- 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.



Rys. 1. Profil stężenia węgla w 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 [7]

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

gdzie: C - stężenie węgla w ciekłym metalu w %, C_{max} - stężenie węgla odpowiadające stanowi nasycenia w danych warunkach w %, D_c - współczynnik dyfuzji w $m^2 s^{-1}$, 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).

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 się powierzchnia nawęglacza czystego, wskutek jego zużycia się.

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. 1. - 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 ruchu cząstek i pęcherzy.

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

3. STRUMIEŃ DWUFAZOWY W OŚRODKU CIEKŁYM.

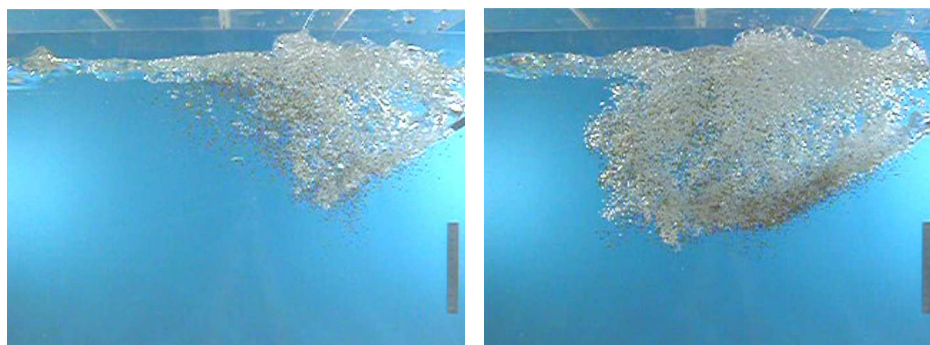
Z uwagi na złożoność zjawisk występujących w procesie wprowadzania cząstek w strumieniu gazu do ciekłego metalu, wiele z nich nadal pozostaje niewyjaśnionych. Dlatego często prowadzone są badania modelowe. W niniejszym artykule podjęto również próbę określenia wpływu parametrów pneumatycznego przemieszczania oraz gęstości i średnicy wdmuchiwanego cząstek na zasięg strumienia w ośrodku ciekłym. Z uwagi na zakres przeprowadzonych badań w pracy nie analizowano jaką można uzyskać głębokość przenikania strumienia dwufazowego w ciekłym metalu. To wymaga przeprowadzenia dodatkowych eksperymentów na innej cieczy modelowej i przy zastosowaniu analizy wymiarowej (liczb Re , Fr , We , Nj , Ma) można podjąć próbę obliczenia zasięgu strumienia.

Do badań wdmuchiwania zastosowano proszki polietylenowe, polistyrenowe oraz nasiona o określonej ziarnistości, obliczonej średnicy zastępczej ziaren (d_c) i zmierzonej gęstości (ρ).

Łącznie przeprowadzono 68 eksperymentów, w których uzyskano następujące wartości parametrów pneumatycznego wdmuchiwania:

- natężenie przepływu gazu $m_g = 1,075 \div 3,12 \cdot 10^{-3}$ kg/s,
- natężenie przepływu materiału $m_c = 8,6 \div 35,3 \cdot 10^{-3}$ kg/s,
- prędkość gazu na wylocie z lancy $w = 29,6 \div 85,6$ m/s,
- stężenie masowe mieszaniny $\mu = 4,06 \div 18,67$ kg/kg.

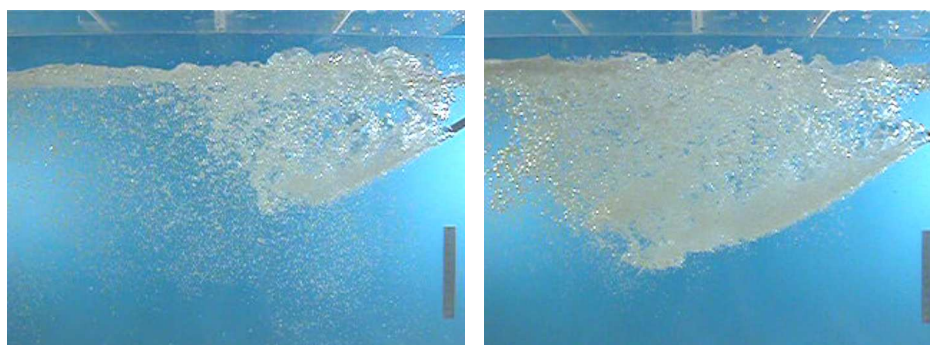
W wyniku tak szerokiego zakresu zmian poszczególnych parametrów uzyskano głębokość przenikania strumienia dwufazowego w zakresie $0,124 \div 0,444$ m. Obraz strumienia dla części eksperymentów przedstawiono na rys. 2 ÷ 4.



$$m_c = 0,01065 \quad m_g = 0,001780$$

$$m_c = 0,02234 \quad m_g = 0,002861$$

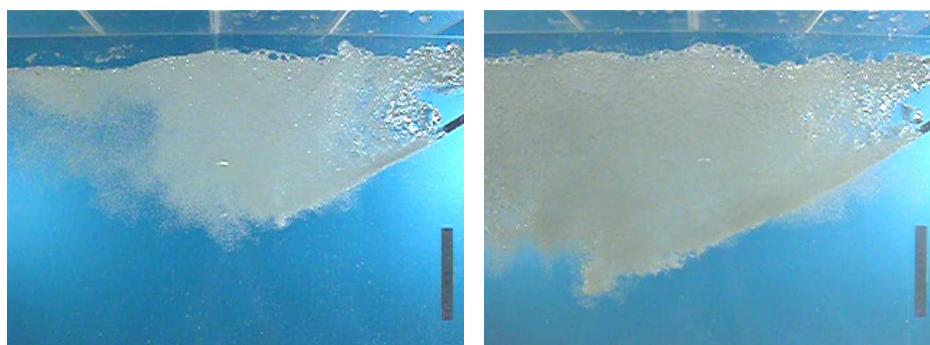
Rys.2. Obraz strumienia dwufazowego przy wdmuchiwaniu cząstek o średnicy $d_c=1,2$ mm i gęstości $\rho=755$ kg/m³.



$$m_c = 0,01165 \quad m_g = 0,001764$$

$$m_c = 0,02667 \quad m_g = 0,002811$$

Rys. 3. Obraz strumienia dwufazowego przy wdmuchiwaniu cząstek o średnicy $d_c=1,2$ mm i gęstości $\rho=626$ kg/m³



$$m_c = 0,01446 \quad m_g = 0,001572$$

$$m_c = 0,03158 \quad m_g = 0,00221$$

Rys.4. Obraz strumienia dwufazowego przy wdmuchiwaniu cząstek o średnicy $d_c=0,39$ mm i gęstości $\rho=626,9$ kg/m³

Na podstawie wyników badań przeprowadzono analizę statystyczną w celu określenia wpływu średnicy zastępczej cząstki (d_c) i jej gęstości (ρ) oraz natężenia przepływu gazu (\dot{m}_g) i materiału (\dot{m}_c) na głębokość przenikania strumienia (L). Uzyskano następujące równanie:

$$L = 0,209 - 4,28 * 10^{-2} * d_c - 2,44 * 10^{-4} * \rho + 6,89 * \dot{m}_c + 54,02 * \dot{m}_g \quad (2)$$

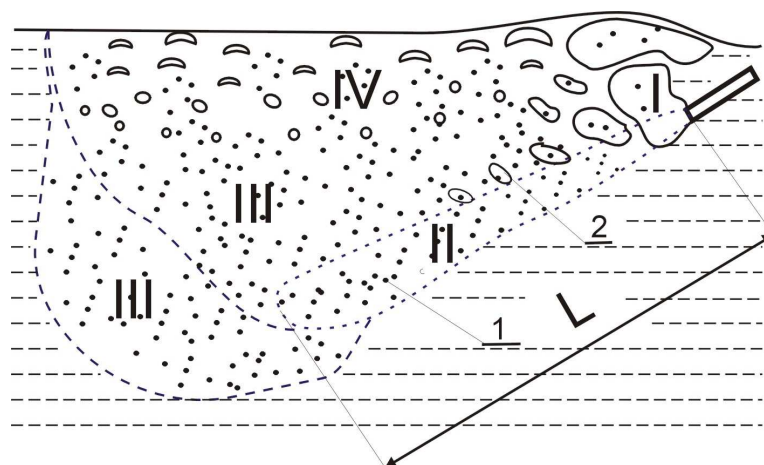
przy następujących wartościach parametrów statystycznych:

$$\bar{L} = 0,268 \quad F = 172 \quad R = 0,961 \quad S = 7,7 \% \quad \alpha = 0,005$$

gdzie: \bar{L} - wartość średnia, F - test Fishera, α - poziom ufności, R - współczynnik korelacji wielokrotnej, S - odchylenie standardowe w [%]

Z uzyskanej zależności wynika, że wzrost zasięgu strumienia dwufazowego można uzyskać przez zwiększenie natężenia przepływu gazu i materiału. Cząstki o większej średnicy zastępczej i gęstości będą wnikać do ciekłego metalu na mniejszą odległość. Wynika to zapewne z faktu, iż ziarna mniejsze i lżejsze mogą uzyskać w trakcie przemieszania większe prędkości (większe wartości współczynnika poślizgu) a w konsekwencji większą energię kinetyczną, która zapewni lepsze przenikanie strumienia. Podobne spostrzeżenia nasuwają się przy obserwacji obrazu strumienia przedstawionego na rys. 2 –4. Dodatkowo widoczne jest przy wdmuchiwanie drobnych i lżejszych cząstek, że strumień wylotowy posiada mniejszy kąt rozwarcia.

Na rys 5. przedstawiono hipotetyczny obraz strumienia dwufazowego. Wyróżnić w nim można pewne charakterystyczne strefy. Strefa I – bezpośrednio na wylocie 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 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. 5. Kształt i obszary strumienia dwufazowego, 1 – cząstki nawęglacza, 2 – pęcherze gazowe.

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. Porównując wielkość tych stref na rys. 2, 3 i 4 można zauważyć różnice zarówno w długości jak i kształcie. Z równania 2 wynika, że zwiększenie tej strefy jest możliwe przez zmniejszenie średnicy wdmuchiwanego cząstek i wzrost parametrów przepływu strumienia dwufazowego. 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. Strefa IV to pęcherze gazowe o kształcie kuli, elipsoidy lub czaszy kulistej. Zależne to będzie od miejsca powstania pęcherza i jego wielkości. Z pewnością przesuając 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. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyniki badań stanowią fragment zaplanowanego cyklu badawczego. Dalsze eksperymenty są w trakcie realizacji. Na podstawie dotychczas wykonanych badań można wywnioskować, że wdmuchiwanie drobnych cząstek jest bardzo korzystne nie tylko z punktu widzenia metalurgicznego (duża powierzchnia styku reagujących faz), ale również z uwagi na uzyskiwanie znacznie większych zasięgów przenikania strumienia dwufazowego i zwiększenia przez to strefy bezpośredniego oddziaływania metal – nawęglacz.

Badania zrealizowano w ramach projektu badawczego Nr 4 T08B 038 23 finansowanego przez KBN.

LITERATURA

1. K. Janerka, Praca doktorska, Gliwice 1995.
2. M. Kanafek, D. Homa, K. Janerka K, Przegląd Odlewnictwa, 1999, nr 7
3. J. Kokoszka, J. Markowski, K. Janerka, J. Jezierski, D. Homa, W. Chmielorz, Krzepnięcie Metali i Stopów, PAN Katowice, v.1, nr 41, 1999
4. K. Janerka, J. Gawroński, M. Cholewa, J. Szajnar, H. Szlumczyk, J. Jezierski, Krzepnięcie metali i Stopów, PAN Katowice, v. 1, nr 39, 1999
5. J. Gawroński, K. Janerka, M. Cholewa, J. Szajnar, Acta Metallurgica Slovaca, v.5, 1999
6. S. Tochowicz, Biblioteka Metalurga - Wytapianie stali w piecach elektrycznych, Wyd. Śląsk, 1988
7. R. Krzeszewski, Kinetyka rozpuszczania węgla w ciekłym żelazie, Prace Inst. Odl., nr 1-3, Kraków 1963