

MODELOWANIE FIZYCZNE PROCESU WDMUCHIWANIA PROSZKÓW DO CIEKŁEGO METALU

JANERKA Krzysztof, GAWROŃSKI Józef, CHOLEWA Mirosław,
SZAJNAR Jan, SZLUMCZYK Henryk, JEZERSKI Jan
Katedra Odlewnictwa Wydziału Mechanicznego Technologicznego,
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice Towarowa 7, POLAND

STRESZCZENIE

Wdmuchiwanie sproszkowanych materiałów do ciekłego metalu jest metodą pozwalającą na intensyfikację prowadzonego procesu metalurgicznego (nawęglanie, wprowadzanie dodatków stopowych, cząstek dyspersyjnych w celu otrzymania kompozytu). Bardzo ważnym zagadnieniem jest poznanie oddziaływania strumienia dwufazowego w ciekłym metalu. Szczególnie istotne znaczenie ma głębokość przenikania strumienia w zależności od sposobu wprowadzenia lancy oraz natężenia przepływu gazu i materiału. Jedyną drogą umożliwiającą określenie tych parametrów jest przeprowadzenie badań modelowych. Stąd w pracy przedstawiono zagadnienia modelowania fizycznego wdmuchiwania cząstek o różnej gęstości, położeniu lancy i zmiennych parametrach strumienia dwufazowego do wody. Stanowią one podstawę do określenia optymalnych parametrów wdmuchiwania cząstek zbrojących do osnowy kompozytu wytwarzanego na bazie stopów aluminium.

1. Wprowadzenie

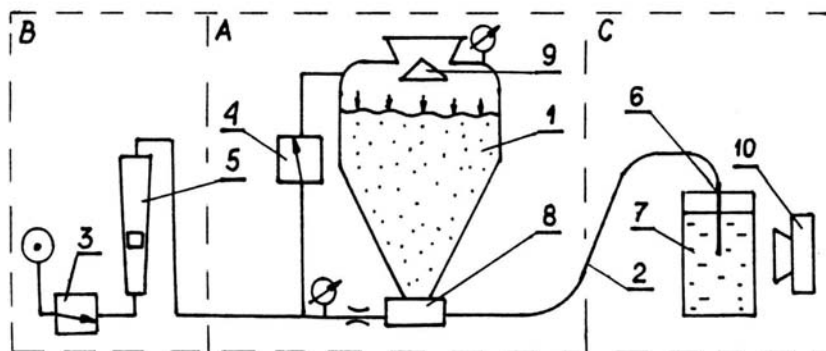
Proces wdmuchiwania cząstek zbrojących do osnowy kompozytu jakim jest ciekłe aluminium powinien zapewniać:

- Stabilne parametry strumienia dwufazowego w trakcie realizacji eksperymentu (natężenie przepływu gazu i materiału),
- Równomierne rozproszczenie cząstek dyspersoidu w całej objętości ciekłego metalu,
- Odpowiednią dynamikę strumienia dwufazowego dla zapewnienia jego przenikania w głąb kąpieli metalowej przy jednoczesnym ograniczeniu natężenia przepływu gazu w celu ograniczenia rafinacji i wypływania cząstek na powierzchnię,

- Krótki czas wdmuchiwania dla ograniczenia spadku temperatury ciekłego metalu.
- Powyższe czynniki wymagają analizy charakterystyki pracy urządzenia nadawczego jak również wizualizacji strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym, co jest przedmiotem niniejszej pracy. Jej głównym celem jest określenie optymalnego zakresu pracy urządzenia i sposobu wprowadzania lancy w aspekcie uzyskiwania kompozytu dyspersyjnego.

2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze zostało skonstruowane na bazie podajnika komorowego transportu pneumatycznego wysokociśnieniowego - rys.1. Składa się ono z następujących układów: nadawczego A, zasilania gazem nośnym B i wprowadzania proszku C [1, 2, 3].



Rys. 1. Stanowisko badawczo – pomiarowe
Fig. 1. Research stand

Układem nadawczym jest zbiornik ciśnieniowy (1) o pojemności $0,01 \text{ m}^3$. W dolnej części znajduje się zawór obrotowy (8); stanowiący jednocześnie komorę mieszania; pozwalający na odcinanie dopływu materiału do rurociągu transportowego. Posiada on kształt dyszy Laval'a z wydrążonym gniazdem, w którym umieszczona jest wymienna dysza regulacyjna. Zmiana średnicy dyszy pozwala na sterowanie natężeniem przepływu powietrza. Przy otwartym zaworze materiał zsypuje się do rurociągu i jest unoszony przez strugę gazu. Obrót zaworu o ok. 90° powoduje odcięcie dopływu proszku do rurociągu. W górnej części zbiornika znajduje się zawór dzwonowy (9). Naciski w zbiorniku, mające wpływ na wydajność urządzenia regulowane jest zaworem redukcyjnym (4). Do pomiaru nacisków w poszczególnych punktach stanowiska zamontowano manometry sprężynowe. Układ zasilania czynnikiem nośnym może składać się ze sprężarki lub butli z gazem obojętnym (np. argonu), rotametu do pomiaru natężenia przepływu gazu (5), oraz reduktora do regulacji nacisków zasilania (3), wpływającego na natężenie przepływu gazu. Układ bezpośredniego wprowadzania proszków do cieczy

składa się z przewodów transportowych (2) zakończonych lancą (6) wprowadzaną do zbiornika cylindrycznego (7) wykonanego ze szkła organicznego. Przebieg procesu rejestrowano na kliszy aparatu fotograficznego (10).

Proces wdmuchiwania obejmuje szereg czynności związanych obsługą urządzenia. Po wsypaniu porcji materiału do zbiornika ciśnieniowego, następuje zamknięcie zaworu dzwonowego i doprowadzenie powietrza nad materiał i do komory mieszania, skąd jest unoszony przez gaz nośny, a następnie przewodami transportowymi przemieszczany do lancy. Poprzez lancę, mieszanina gazu i materiału, jest wprowadzana do cieczy.

3. Parametry strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym

Dla opisu przemieszczania strumienia dwufazowego, w trakcie badań posługiwano się poniższymi zależnościami, umożliwiającymi obliczenie:

Natężenie przepływu gazu to ilość gazu przepływającego przez dany odcinek na jednostkę czasu. Może być określone jako masowe lub objętościowe.

- masowe m_g wyrażone jest w jednostkach masy kg/s,
- objętościowe V_N jest w jednostkach objętości m^3/s ,

Prędkość gazu na wylocie lancy

$$w = \frac{m_g}{A \rho} \quad (1)$$

gdzie: A – pole powierzchni wylotu lancy, ρ - gęstość powietrza na wylocie z lancy.

Natężenie przepływu materiału transportowanego (wydajność) określa się poprzez stosunek masy transportowanego materiału m_c w czasie t stabilnej pracy instalacji.

Stężenie masowe mieszaniny określone przez stosunek natężenia przepływu materiału do natężenia przepływu gazu w rurociągu.

Przy wprowadzaniu strumienia gazu lub mieszaniny gazu z proszkiem do kąpiel metalowej wyróżnia się dwa stany przepływu, a mianowicie: barbotaż i przepływ strumieniowy.

Barbotaż – charakterystyczny dla małych natężeń przepływów materiałów 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.

Przepływ strumieniowy – ma miejsce przy dużych natężeniach przepływu materiału i dużych prędkościach 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.

Drugi przypadek jest bardziej korzystny od barbotażu, tak więc należy dążyć do osiągnięcia na wylocie z lancy parametrów charakterystycznych dla przepływu strumieniowego.

Jedną z prób rozgraniczenia przepływu strumieniowego od barbotażu podjęli Farias i Robertson [4] przez wprowadzenie do analizy charakteru strumienia, współczynnika przepływu N_E :

$$N_E = 0,75 \cdot \frac{m_c \cdot h \cdot \rho_g}{m_g \cdot d_c \cdot \rho_l} \quad (2)$$

gdzie:

- m_c – masowe natężenie przepływu proszku w kg/s,
- m_g – masowe natężenie przepływu gazu w kg/s,
- d_c – średnica wdmuchiwanej cząstki w m.,
- ρ_g – gęstość gazu na wylocie z lancy w kg/m³,
- ρ_l – gęstość ciekłego metalu w kg/m³,
- h – wskaźnik wielkości pęcherzy

Po analizie badań stwierdzono iż dla $N_E < 3$ zachodzi zjawisko barbotażu, gdy $N_E > 4,5$ przepływ strumieniowy. Jeśli wynik obliczeń będzie w zakresie $3 < N_E < 4,5$ to zachodzi stan przejściowy.

Kimura,[5] wprowadził do analizy współczynnik strumienia N_j wyrażony zależnością:

$$N_j = 1,5 \cdot \frac{m_c \cdot w^2 \cdot \rho_g}{m_g \cdot w_c \cdot d_c \cdot \rho_l} \quad (3)$$

gdzie:

- w, w_c – odpowiednio prędkość gazu i cząstek na wylocie z lancy w m/s.

Określił on, że dla N_j poniżej 1000 strumień będzie wykazywał cechy barbotażu, natomiast dla $N_j > 1500$ jednolity strumień zapewnia dużą penetrację w głąb kąpielii metalowej. Podobnie jak u Fariasa i Robertsona, także Kimura określił, że stan przejściowy zachodzi dla N_j w przedziale $1000 < N_j < 1500$.

Dla prowadzenia procesu wdmuchiwania proszków do ciekłego metalu istotnym zagadnieniem jest również poznanie głębokości przenikania strumienia dwufazowego. Poniższa zależność określa odległość przenikania cząstek w funkcji kąta pochylenia lancy[6]

$$L = \left[\frac{3 m_c \cdot w_c \cdot \sin \alpha}{\pi \tan^2(\theta/2) \rho \cdot g} \right]^{1/3} \quad (4)$$

- gdzie: L – odległość penetracji cząstek,
 L_0 – odległość między wniknięciem cząstek do ośrodka a wirtualnym punktem rozejścia się strumienia w dyszy,
 α – kąt wprowadzenia lancy,
 θ – kąt stożka rozejścia strumienia,

ρ - gęstość ośrodka ciekłego,
 w_c - szybkość cząstek w lancy,
 g - przyspieszenie ziemskie
 m_c - natężenie przepływu cząstek.

4. Wyniki badań i obliczeń

Bardzo duży wpływ na głębokość przenikania strumienia posiada natężenie przepływu gazu. Zmieniało się ono w realizowanym cyklu badawczym w zakresie 0,000432 – 0,000834 kg/s. Analizując uzyskane obrazy głębokości przenikania strumienia, mając jednocześnie na uwadze niekorzystne zjawiska występujące przy wzroście natężenia przepływu w aspekcie prowadzonych badań wdmuchiwania cząstek do ciekłego metalu, należy stwierdzić iż $m_g = 0,000432$ kg/s zapewnia już korzystne warunki przebiegu procesu.

Natężenie przepływu materiału zmieniało się w realizowanym cyklu badawczym w zakresie 0,0109 – 0,0360 kg/s. Wielkość ta ma wpływ na współczynniki przepływu i strumienia. Wzrost natężenia przepływu materiału powoduje zwiększenie tych współczynników. Decyduje ono również o stężeniu masowym mieszaniny, które zmieniało się w realizowanych eksperymentach w zakresie 19,2 – 62,2 kg/kg. Większe wartości tych parametrów powodują skrócenie czasu wdmuchiwania co z pewnością powoduje mniejszy spadek temperatury. Jednak przy większych wydajnościach urządzenia (dla tych samych warunków geometrycznych) występują mniej stabilne warunki strumienia (pulsowanie), niekorzystne dla przebiegu wdmuchiwania do ciekłego metalu.

Jak już wcześniej wspomniano do analizy strumienia można wykorzystać współczynniki strumienia i przepływu. Biorąc pod uwagę ten pierwszy należy stwierdzić, iż w całym zakresie prowadzonych eksperymentów występował przepływ strumieniowy, bardziej korzystny dla procesów wdmuchiwania cząstek do ośrodka ciekłego. Z kolei analiza współczynnika przepływu wskazuje, iż mieliśmy do czynienia w prowadzonym procesie z barbotażem. Jeszcze raz potwierdziło to trudność w opisie i rozgraniczeniu tych dwóch przypadków. Współczynniki te ze względu na dużą ilość parametrów jakie ujmują w swych postaciach zostały wykorzystane do obliczeń głębokości przenikania strumienia.

Uzyskane wyniki badań i pomiarów głębokości przenikania strumienia różnią się dosyć znacznie w porównaniu z głębokością obliczoną wg zależności 4. Jest to podyktowane z pewnością faktem, iż równanie to nie ujmuje gęstości cząstek, ich średnicy, gęstości ośrodka ciekłego oraz gazu. Przeprowadzona analiza statystyczna głębokości przenikania strumienia zmierzonej na fotografiach i obliczonej z zależności 4 wykazała bardzo małe ich korelacje, a mianowicie rzędu 0,18 i 0,5.

Na podstawie uzyskanych wyników badań, odczytów, obliczeń zasięgu wprowadzania i wielkości charakteryzujących strumień dwufazowy przeprowadzono analizę statystyczną, której celem jest określenie zależności głębokości przenikania strumienia dwufazowego (mierzonej od powierzchni lustra cieczy) w funkcji

parametrów strumienia i własności cząstek. W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano następujące zależności:

$$L_{pow} = 0,19867 - 1,1168 \cdot 10^5 \cdot \rho_c - 0,873 \cdot H + 7,813 \cdot 10^{-6} \cdot N_j \quad (5)$$

dla następujących wartości parametrów statystycznych:

$$\begin{array}{lll} L_{pow} = 0,248 & S = 15,7 \% & R=0,9313 \\ F=67,58 & w = 6,87 & \end{array}$$

gdzie:

- L_{pow} – wartość średnia,
- S - odchylenie standardowe,
- R – współczynnik korelacji wielokrotnej,
- F – test Fishera,
- w – test wiarygodności dla zbioru i funkcji.

$$L_{pow} = 0,199 - 8,886 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_c - 0,907 \cdot H + 687,03 \cdot N_E \quad (6)$$

dla następujących wartości parametrów statystycznych:

$$\begin{array}{lll} L_{pow} = 0,246 & S = 14,4 \% & R=0,9166 \\ F=52,53 & w = 5,68 & \end{array}$$

W obydwu przypadkach uzyskano zbliżone wartości przenikania strumienia, mimo iż współczynniki te różnią się w opisie charakteru tegoż strumienia. Uzyskane z obliczeń wartości głębokości przenikania pokazują iż nawet dla najmniejszych wartości L_{pow} będzie zachodziła penetracja cząstek w ciekłym metalu na całej głębokości, co zapewni dobre mieszanie i rozproszanie dyspersoidu w całej objętości.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania modelowe pozwoliły na:

- przedstawienie obrazu strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym, jego rozproszenia, mieszania cieczy, przenikania włąb ośrodka ciekłego.
- określenie wpływu natężenia przepływu gazu na głębokość przenikania strumienia.
- dobór położenia lancy w stosunku do powierzchni lustra cieczy, przy zachowaniu odpowiedniej głębokości przenikania strumienia dwufazowego oraz zmniejszeniu lub nawet wyeliminowaniu niekorzystnych zjawisk zachodzących na powierzchni cieczy, do której wprowadzany będzie reagent,
- określenie wpływu gęstości materiału na uzyskiwane zasięgi strumienia dwufazowego,
- uzyskanie zależności, pozwalających na wyznaczenie głębokości przenikania strumienia dwufazowego w ciekłym aluminium z dużą dokładnością.

Była to jedyna droga umożliwiająca stwierdzenie powyższych faktów, wnosząc jednocześnie wiele bardzo ciekawych spostrzeżeń i uwag do prowadzenia procesu wdmuchiwania dyspersoidu do ciekłego aluminium.

Analizując zasięg przenikania strumienia jednofazowego w ośrodku ciekłym należy stwierdzić, iż jest on bardzo mały nawet przy zanurzonej lancy. Można

jednocześnie zauważyć bardzo duże „wzburzenie” ośrodka ciekłego na powierzchni. Z punktu widzenia procesu wdmuchiwania do ciekłego metalu oznacza to, że należy unikać wprowadzania lancy przy przepływie tylko samego gazu nośnego (przed otwarciem dopływu materiału). Głębokość przenikania przy przepływie strumienia dwufazowego jest znacznie wyższa. Można zauważyć jej wzrost w miarę zanurzania lancy i zwiększania gęstości wprowadzanego proszku. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki badań modelowych można stwierdzić, iż dla procesu wprowadzania dyspersoidu do osnowy metalowej w celu otrzymania kompozytu najkorzystniejsze warunki można uzyskać przy położeniu lancy bezpośrednio nad powierzchnią lustra metalu. Zapewni to odpowiednią przenikalność strumienia i równomierne rozmieszczenie cząstek w całej objętości przy zmniejszeniu rafinacji metalu przez gaz nośny. Ograniczy również w znacznym stopniu „rozpryskiwanie” ciekłego metalu. Zwiększenie natężenia przepływu gazu powoduje wzrost zasięgu oddziaływania strumienia przy wroście zjawisk niekorzystnych (wzburzenie powierzchni i rozpryskiwanie). Parametry strumienia dwufazowego powinny być tak dobrane aby zapewnić stężenie masowe mieszaniny w zakresie 20-40 kg/kg (w zależności od wprowadzanego dyspersoidu).

Literatura

1. Janerka K.; Nawęglanie ciekłych stopów żelaza za pomocą urządzeń pneumatycznych. Praca doktorska, Gliwice 1995 r.
2. Janerka K, Jura S, Piątkiewicz Z, Szluczyk H, Jezierski J.; Szybkość nawęglania w funkcji parametrów strumienia dwufazowego w pneumatycznym nawęglaniu ciekłych stopów żelaza, Krzepnięcie Krzepnięcie metali i stopów, ZN PAN, z.38, Katowice, 1998
3. Gawronski J, Cholewa M, Janerka K, Szajnar J.; Wytwarzanie odlewów kompozytowych metodą pneumatycznego wprowadzania i mieszania cząstek ceramicznych, Sprawozdanie z Projektu Badawczego finansowanego przez KBN nr 7 T08D 031 12, niepublikowane.
4. Farias L, Robertson D.G.C.: Physical modelling of gas - powder injection into liquid metals, Electric Furnace Conf. Proc., Dallas 1986.
5. Farias L.R, Irons G.A.: A unified approach to bubbling - jetting phenomena in powder injection into iron and steel, Metallurgical Transaction B, nr 6, 1985.
6. Engh T.A, Larsen K.: Penetration of particle-gas jets into liquids, Ironmaking and Steelmaking, nr6, 1979.

PHYSICAL MODELING OF POWDERS INJECTION PROCESS INTO THE LIQUID METAL.

ABSTRACT

Injecting of powdered materials into the liquid is a method making possible to intensify the metallurgical process (recarburization, making additions, dispersed particles in order to obtain composites). The issue of the great concern is to learn the effect of the two-phase stream in liquid metal. The matter of the greatest significance is the depth of the stream penetration according to the method of the lance insertion as well as gas and material rate of flow. The only one way making possible to determine those parameters is to carry out the model testing. Thereby, the work presents issues concerning modelling of a physical injection of particles having different densities, at various position of the lance as well as variable parameters of the two-phase stream into water. Obtained results were presented in the form of photographs. They form grounds for optimal parameters determination for reinforcing particles injection to the matrix of the composite produced from aluminum alloys.

Recenzował
Prof. dr hab. inż. Stanisław Jura