

POWIERZCHNIA STRUMIENIA DWUFAZOWEGO W PROCESIE WDMUCHIWANIA PROSZKÓW

K. JANERKA¹, J. GAWROŃSKI², J. JEZERSKI³

Katedra Odlewnictwa Wydziału Mechanicznego Technologicznego
Politechniki Śląskiej.

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono zagadnienia modelowania fizycznego procesu wdmuchiwania sproszkowanych materiałów do ciekłego metalu. Opisano sposób realizacji badań oraz uzyskane wyniki. Szczególną uwagę zwrócono na wpływ parametrów strumienia dwufazowego, własności cząstek oraz własności ośrodka ciekłego na pole powierzchni oraz zasięg strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym o różnej gęstości.

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

1. WPROWADZENIE

Technologia wdmuchiwania sproszkowanych materiałów do ciekłego metalu pozwala na znaczną intensyfikację prowadzonych procesów metalurgicznych (nawęglanie [1, 2], modyfikacja, wdmuchiwanie dodatków stopowych [3]). Szybkość i efektywność realizowanych procesów jest zależna od właściwego doboru parametrów pneumatycznego przemieszczania, własności wdmuchiwanych cząstek oraz temperatury i składu chemicznego ciekłego metalu. Zapewnienie odpowiednich parametrów wymaga znajomości ich wpływu na procesy wymiany masy oraz kształt i zasięg strumienia w ośrodku ciekłym. To z kolei jest możliwe poprzez prowadzenie badań modelowania fizycznego, umożliwiających obserwację i pomiary wielkości charakteryzujących ten proces [4, 5, 6]. W artykule przedstawiono wpływ parametrów

¹ dr inż., janerka@zeus.polsl.gliwice.pl

² prof.zw.dr inż., sekrmt3@zeus.polsl.gliwice.pl

³ dr inż., georgeko@zeus.polsl.gliwice.pl

pneumatycznego przemieszczania, średnicy cząstki i gęstości ośrodka na powierzchnię, głębokość i zasięg strumienia dwufazowego.

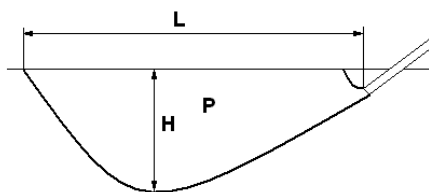
2. WYNIKI BADAŃ I OBLICZEŃ

Proces badawczy obejmował 136 eksperymentów dla cząstek o różnej średnicy i gęstości oraz ośrodka ciekłego o gęstości 1000 i 1180 kg/m³, w których uzyskano następujące wartości parametrów pneumatycznego wdmuchiwania:

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

Z uzyskanych w trakcie badań modelowych plików zapisanych w formacie avi wybrano najbardziej reprezentatywne klatki przedstawiające maksymalny zasięg strumienia wdmuchiwanego proszku tuż przed jego rozproszeniem na skutek zawirowań mieszanej cieczy. Dzięki temu uzyskano zdjęcia pokazujące kształt i wielkość strumienia na wylocie z lancy do cieczy modelowej, które w dalszej kolejności poddano analizie komputerowej. Zdjęcia pogrupowane według średnicy cząstek i gęstości ciekłego ośrodka przedstawione zostały na rys. 2 i 3.

Główne parametry mierzone i obliczane w badaniach to pole powierzchni, długość oraz szerokość strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym (rys. 1).



Rys. 1. Pole powierzchni P , odległość L i głębokość H przenikania strumienia dwufazowego.
Fig. 1. The area P , a distance L and a depth H of diphas stream penetration.

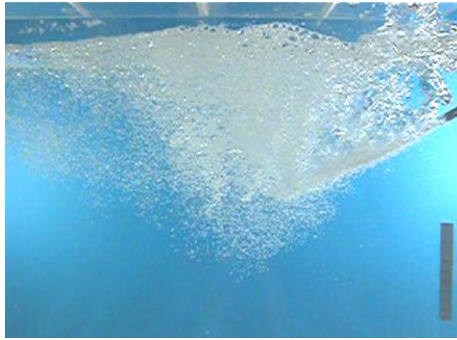
Powierzchnia przenikania strumienia dwufazowego (P)

Przeprowadzono analizę wpływu parametrów określających proces pneumatycznego przemieszczania na wartości pola powierzchni, odległości i głębokości przenikania strumienia dwufazowego (parametry P , L i H). Wielkość P zmienia się w prowadzonych badaniach w zakresie 86,88 – 960,6 cm². Na podstawie uzyskanych wyników badań przeprowadzono analizę statystyczną w funkcji natężenia przepływu materiału m_c , gazu m_g , gęstości ośrodka ciekłego ρ_{OSR} oraz średnicy cząstki d_c , której wynikiem jest następujące równanie:

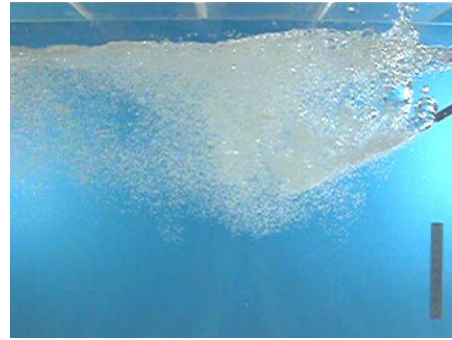
$$P = 1,68 \cdot 10^3 + 1,56 \cdot 10^4 \cdot m_c + 1,05 \cdot 10^5 \cdot m_g - 1,51 \cdot \rho_{OSR} - 1,36 \cdot 10^2 \cdot d_c \quad (1)$$

$$R=0,952 \quad F=303,13 \quad P = 432,02 \quad S=15,63 \quad \alpha=0,005$$

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



Pom. 50 $m_c = 0,01265$ $m_g = 0,001816$



Pom. 47 $m_c = 0,01364$ $m_g = 0,001400$



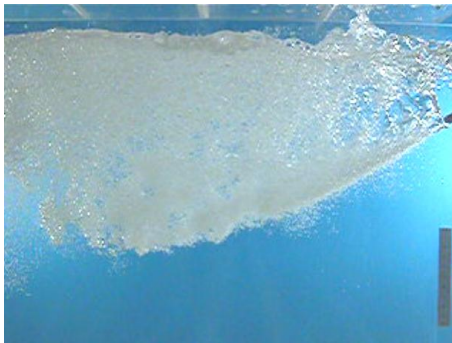
Pom. 48 $m_c = 0,01875$ $m_g = 0,001900$



Pom. 51 $m_c = 0,01667$ $m_g = 0,002175$



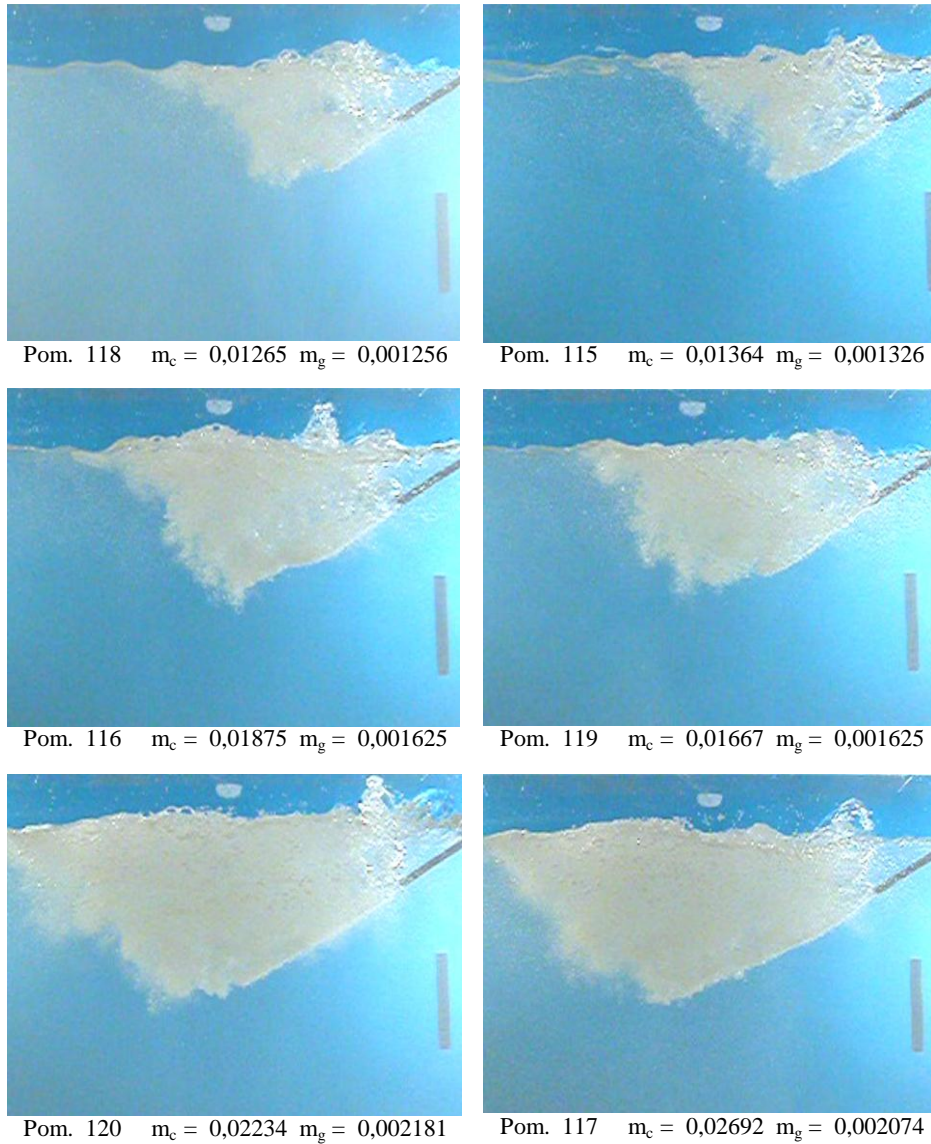
Pom. 52 $m_c = 0,02234$ $m_g = 0,002399$



Pom. 49 $m_c = 0,02692$ $m_g = 0,002078$

Rys. 2. Obraz strumienia dwufazowego przy wdmuchiwaniu cząstek o średnicy $d_c=0,833$ mm i gęstości $\rho_{wL}=882$ kg/m³, $\rho_{osr}=1000$ kg/m³.

Fig. 2. Diphase stream view during injection of $d_c=0,83$ mm diameter particles and a density $\rho_{wL}=882$ kg/m³, $\rho_{osr}=1000$ kg/m³.



Rys. 3. Obraz strumienia dwufazowego przy wdmuchiwaniu cząstek o średnicy $d_c=0,833$ mm i gęstości właściwej $\rho_{wL}=882$ kg/m³, $\rho_{osr}=1180$ kg/m³.

Fig. 3. Diphasic stream view during injection of $d_c=0,833$ mm diameter particles and a density $\rho_{wL}=882$ kg/m³, $\rho_{osr}=1180$ kg/m³.

Powyższa analiza pokazuje, że największy wpływ na wielkość pola powierzchni mają parametry przepływowe m_c i m_g – wraz z ich wzrostem wartość pola powierzchni wzrasta, natomiast zwiększając gęstość ośrodka jak i średnicę cząstek powodujemy zmniejszenie wielkości pola.

Przeprowadzając w dalszej kolejności analizę statystyczną uzyskanych wyników w funkcji stężenia masowego mieszaniny μ oraz gęstości ośrodka ciekłego ρ_{OS} , otrzymano następujące równanie:

$$P = 1,92 * 10^3 + 30,4 * \mu - 1,64 * \rho_{OSR} \quad (2)$$

$$R=0,822 \quad F=133,5 \quad P = 427,26 \quad S=28,46 \quad \alpha=0,005$$

Z tego równania wynika, że im większa wartość parametru μ określającego stężenie mieszaniny gazu i proszku, tym większe pole powierzchni strumienia. Natomiast wraz ze wzrostem gęstości ośrodka ρ_{OSR} wartość powierzchni tego pola maleje.

Wykorzystując uzyskane wyniki badań przeprowadzono analizę statystyczną w funkcji takich parametrów jak liczba przepływu N_E , zmodyfikowana liczba Froude'a Fr_{MOD} oraz liczba Webera We . Współczynnik przepływu N_E określający granicę przepływu strumieniowego od barbotażu zmieniał się w badaniach w zakresie 0,286 – 5,165. Oznacza to, że w eksperymentach zachodziły zjawiska zarówno barbotażu (wartości N_E poniżej 3), fazy przejściowej ($3 < N_E < 4,5$) jak i przepływu strumieniowego (wartości N_E powyżej 4,5). Wynikiem przeprowadzenia analizy statystycznej jest następujące równanie:

$$P = 54,6 + 89,7 * N_E + 25,4 * Fr_{MOD} - 4,15 * We \quad (3)$$

$$R=0,886 \quad F=156,58 \quad P = 425,5 \quad S=23,52 \quad \alpha=0,005$$

Z otrzymanego równania wynika, że wraz ze wzrostem liczby przepływu N_E oraz wzrostem zmodyfikowanej liczby Froude'a zwiększa się pole powierzchni strumienia dwufazowego. Natomiast wzrost liczby Webera powoduje, że wartość pola powierzchni maleje.

Przeprowadzono również na podstawie uzyskanych wyników analizę statystyczną pola powierzchni strumienia w funkcji liczby strumienia N_j , zmodyfikowanej liczby Froude'a Fr_{MOD} oraz liczby Webera We . Parametr N_j podobnie jak poprzednio N_E określa jakie zjawisko zachodzi przy zadanych parametrach przepływowych. Dla N_j poniżej 1000 strumień będzie wykazywał cechy barbotażu, natomiast dla $N_j > 1500$ jednolity strumień zapewnia dużą penetrację w głąb kąpieli metalowej. Podobnie jak w przypadku N_E występuje również stan przejściowy w przedziale $1000 < N_j < 1500$. Wartość liczby N_j zmieniała się w badaniach w zakresie 416,29 – 6126,25.

Analiza statystyczna pozwoliła na uzyskanie następującego równania:

$$P = 67,5 + 9,07 * 10^{-2} * N_j + 20,7 * Fr_{MOD} - 3,42 * We \quad (4)$$

$$R=0,929 \quad F=264,49 \quad P = 428,55 \quad S=19,1 \quad \alpha=0,005$$

Podobnie jak poprzednio otrzymane równanie wskazuje, że pole powierzchni strumienia dwufazowego zwiększa się wraz ze wzrostem liczby strumienia N_j oraz wzrostem zmodyfikowanej liczby Froude'a, natomiast zmniejsza wraz ze wzrostem liczby Webera.

Długość przenikania strumienia dwufazowego od wylotu lancy (L)

Wielkość ta zmienia się w prowadzonych badaniach w zakresie 15,14 – 52,32 cm. Na podstawie uzyskanych wyników badań przeprowadzono analizę statystyczną w funkcji natężenia przepływu materiału m_c , gazu m_g , gęstości ośrodka ciekłego ρ_{OSR} oraz średnicy cząstki d_c , której wynikiem jest następujące równanie:

$$L = 62,9 + 6,68 * 10^2 * m_c + 5,76 * 10^3 * m_g - 4,45 * 10^{-2} * \rho_{OSR} - 5,65 * d_c \quad (5)$$

$$R=0,916 \quad F=162 \quad L = 34,52 \quad S=10,35 \quad \alpha=0,005$$

Równanie to pokazuje, że zwiększając parametry przepływu m_c i m_g zwiększa się zasięg przenikania strumienia dwufazowego w cieczy. Natomiast zwiększając wartości gęstości cieczy ρ_{OSR} , jak również zwiększając średnicę cząstek d_c , wpływa się na zmniejszenie odległości L .

Na podstawie uzyskanych wyników badań przeprowadzono również analizę statystyczną w funkcji stężenia masowego mieszaniny μ oraz gęstości ośrodka ρ_{OSR} , wynikiem której jest następujące równanie:

$$L = 81,2 + 1,41 * \mu - 5,6 * 10^{-2} * \rho_{OSR} \quad (6)$$

$$R=0,756 \quad F=86 \quad L = 34,22 \quad S=17,03 \quad \alpha=0,005$$

Powyższe równanie daje zauważyć, że wraz ze wzrostem parametru μ zwiększa się odległość L , natomiast podobnie jak w poprzedniej analizie ujemnie na parametr L wpływa wzrost wartości gęstości cieczy ρ_{OSR} .

Na podstawie uzyskanych wyników badań i obliczeń przeprowadzono analizę statystyczną w funkcji liczby przepływu N_E , zmodyfikowanej liczby Froude'a Fr_{MOD} oraz liczby Webera We . której wynikiem jest równanie:

$$L = 1,66 + 4,17 * N_E + 0,635 * Fr_{MOD} - 8,76 * 10^{-2} * We \quad (7)$$

$$R=0,837 \quad F=97 \quad L = 34,44 \quad S=14,16 \quad \alpha=0,005$$

Przeprowadzono również na podstawie uzyskanych wyników analizę statystyczną w funkcji liczby strumienia N_j , zmodyfikowanej liczby Froude'a Fr_{MOD} oraz liczby Webera We . Wynikiem jest następujące równanie:

$$L = 17,8 + 3,77 * 10^{-3} * N_j + 0,447 * Fr_{MOD} - 5,71 * 10^{-2} * We \quad (8)$$

$$R=0,862 \quad F=120 \quad L = 34,44 \quad S=13,1 \quad \alpha=0,005$$

Oba powyższe równania pokazują, że wraz ze wzrostem liczb przepływu N_E i strumienia N_j oraz zmodyfikowanej liczby Froude'a odległość L zwiększa się, natomiast wraz ze wzrostem wartości We długość strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym ulega zmniejszeniu.

Głębokość przenikania strumienia dwufazowego (H)

W prowadzonych badaniach wielkość ta zmienia się w zakresie 10,24 – 30,14 cm. Na podstawie uzyskanych wyników badań przeprowadzono analizę statystyczną w funkcji natężenia przepływu materiału m_c , gazu m_g , gęstości ośrodka ciekłego ρ_{OSR} oraz średnicy cząstki d_c , której wynikiem jest następujące równanie:

$$H = 59,9 + 2,68 * 10^2 * m_c + 1,42 * 10^2 * m_g - 4,28 * 10^{-2} * \rho_{OSR} - 2,7 * d_c \quad (9)$$

$$R=0,939 \quad F=235 \quad H = 19,12 \quad S=9,04 \quad \alpha=0,005$$

Z powyższego równania wynika, że zwiększając parametry przepływu m_c i m_g powoduje się wzrost głębokości przenikania strumienia dwufazowego, natomiast zwiększając parametry ρ_{OSR} i d_c wartość głębokości zmniejsza się.

Przeprowadzono również analizę statystyczną w funkcji stężenia masowego mieszaniny μ , gęstości ośrodka ρ_{OSR} i średnicy cząstki d_c , w wyniku której otrzymano następujące równanie:

$$H = 63,2 + 0,462 * \mu - 4,34 * 10^{-2} * \rho_{OSR} - 1,77 * d_c \quad (10)$$

$$R=0,903 \quad F=163 \quad H = 18,96 \quad S=11,23 \quad \alpha=0,005$$

W tym wypadku równanie wskazuje, że wraz ze wzrostem stężenia mieszaniny μ wartość głębokości przenikania rośnie, natomiast przy wzroście gęstości ośrodka ciekłego oraz wzroście średnicy cząstek głębokość ta ulega pomniejszeniu.

Przeprowadzając w dalszej kolejności analizę statystyczną uzyskanych wyników w funkcji liczby przepływu N_E , zmodyfikowanej liczba Froude'a Fr_{MOD} oraz liczby Webera We otrzymano następujące równanie:

$$H = 12,8 + 1,72 * N_E + 0,703 * Fr_{MOD} - 0,123 * We \quad (11)$$

$$R=0,913 \quad F=133 \quad H = 19,23 \quad S=12,55 \quad \alpha=0,005$$

Na podstawie uzyskanych wyników badań przeprowadzono dodatkowo analizę statystyczną w funkcji liczby strumienia N_j , zmodyfikowanej liczby Froude'a Fr_{MOD} oraz liczby Webera We , której wynikiem jest następujące równanie:

$$H = 13,2 + 1,63 * 10^{-3} * N_j + 59,4 * Fr_{MOD} - 0,106 * We \quad (12)$$

$$R=0,896 \quad F=172 \quad H = 19,02 \quad S=11,67 \quad \alpha=0,005$$

Oba powyższe równania pokazują, że podobnie jak w przypadku długości strumienia L wraz ze wzrostem liczb przepływu N_E i N_j oraz zmodyfikowanej liczby Froude'a głębokość H zwiększa się, natomiast wraz ze wzrostem wartości liczby We głębokość przenikania strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym ulega zmniejszeniu.

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie wykonanych badań można wywnioskować, że wzrost parametrów pneumatycznego przemieszczania (natężenia przepływu gazu i materiału) zwiększa powierzchnię, zasięg i głębokość przenikania strumienia dwufazowego. 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. Gęstość ośrodka ciekłego obniża wartości analizowanych parametrów. Wzrost gęstości o 18 % powoduje zmniejszenie powierzchni o 49%, długości przenikania strumienia o 22%, a głębokości o 33%.

LITERATURA

- [1] Kanafek M, Homa D, Janerka K.; Nawęglanie żeliwa w Odlewni TEKSID Poland S. A. za pomocą urządzenia pneumatycznego POLKO, Przegląd Odlewnictwa, t. 49, 1999, nr 7
- [2] Janerka K., Bartocha D.; Pneumatyczne nawęglanie przy produkcji żeliwa syntetycznego, Mat X Międzyn. Konf. Współpraca 2004, Tatranska Lomnica, 2004.
- [3] Jezierski J., Pneumatic injection of ferroalloys into liquid cast iron, Proc. 12th Internat. Confer. METAL 2003, VUB Ostrawa, Hradec nad Moravici, 2003.
- [4] Gawroński J., Janerka K., Cholewa M., Szajnar J.: „Modelowanie pneumatycznego wprowadzania cząstek zbrojących do osnowy kompozytu”, Acta Metallurgica Slovaca, v.5, 1999r,
- [5] Janerka K., Obraz strumienia dwufazowego w procesie wdmuchiwania proszków do cieczy, Archiwum Odlewnictwa, vol. 2, nr 5, 2002
- [6] Janerka K., Jezierski J.: Wpływ parametrów pneumatycznego wdmuchiwania i własności cząstek na zasięg strumienia, Archiwum Odlewnictwa, vol. 3, nr 9, 2004

Badania wykonano w ramach realizacji projektu badawczego Nr 4 T08B 038 23 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych

DIPHASE STREAM AREA IN PNEUMATIC POWDER INJECTION PROCESS

In the paper were presented the issues of the physical modelling of the powdered materials into liquid metal. There were described the method of making the investigations and their results. A particular attention was paid on the diphas stream parameters, particles and liquid properties on the area and the range of diphas stream in liquid.

Recenzował Prof. Jan Szajnar