

NAGRZEWANIE CZĄSTEK GRAFITU W CIEKŁYM METALUK JANERKA¹, D. BARTOCHA², J. SZAJNAR³Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Odlewnictwa,
Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska,
44-100 Gliwice, ul. Towarowa 7,

STRESZCZENIE

W artykule podjęto próbę analizy rozpuszczania cząstek węgla wprowadzonych do ciekłego metalu. Szczególną uwagę zwrócono na czas nagrzewania cząstek. Dokonano porównania tego czasu z czasem wypływania cząstek na powierzchnię kąpieli metalowej. Ma to na celu określenie optymalnej wielkości cząstek dla zapewnienia maksymalnego stopnia przyswojenia węgla z nawęglacza.

Key words: liquid metal, carbon dissolution, injection.

1. WPROWADZENIE

W procesie wytopu żeliwa coraz częściej zachodzi konieczność dokonywania korekty węgla w piecu metalurgicznym. Ważne w tym przypadku jest uzyskanie zamierzonego przyrostu węgla w jak najkrótszym czasie. Najczęściej wprowadza się nawęglacz do wsadu metalowego na dno pieca przed rozpoczęciem procesu topienia lub dodaje się na powierzchnię metalu po roztopieniu wsadu. W tym drugim przypadku bardzo istotnym problemem jest możliwość wymuszenia ruchu kąpieli metalowej w celu wprowadzenia nawęglacza w głąb pieca. Uzyskuje się wtedy znacznie większą powierzchnię kontaktu nawęglacz – ciekły metal niż ma to miejsce w przypadku, gdy nawęglacz pokrywa tylko lustro ciekłego metalu. Nie wszystkie jednak piece posiadają takie możliwości i pojawia się problem z uzyskaniem wysokiej efektywności nawęglania w krótkim czasie. Zastosowania przemysłowe w piecach elektrycznych łukowych i badania laboratoryjne w piecach indukcyjnych pokazały, że bardzo wysokie

¹ dr inż., krzysztof.janerka@polsl.pl

² dr inż., dariusz.bartocha@polsl.pl

³ dr hab.inż., Prof. Pol. Śląskiej jan.szajnar@polsl.pl

efektywności procesu można uzyskać stosując pneumatyczne wprowadzanie nawęglacza [1, 2, 3]. Cząstki zostają wprowadzane do kąpielii metalowej, a gaz nośny wymusza ruch ciekłego metalu. W artykule podjęto próbę odpowiedzi na pytania: jak szybko nagrzewają się cząstki węgla w ciekłym metalu i jaki jest czas potrzebny do tego aby przed wypłynięciem na powierzchnię zdążyły się nagrzać i rozpuścić.

2. WYPŁYWANIE CZĄSTEK NA POWIERZCHNIĘ

W procesach wprowadzania cząstek do kąpielii metalowej ważnym zjawiskiem jest ich wypływanie na powierzchnię. Prędkość tego ruchu określana jest zależnością wynikającą z analizy sił działających na cząstkę zanurzoną w ośrodku ciekłym (siła grawitacji, siła wyporu i siła oporu ruchu – siła Stokesa) [4]:

$$w = 0,0556 \cdot \left(\frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\eta} \right) \cdot d^2 \cdot g \quad (1)$$

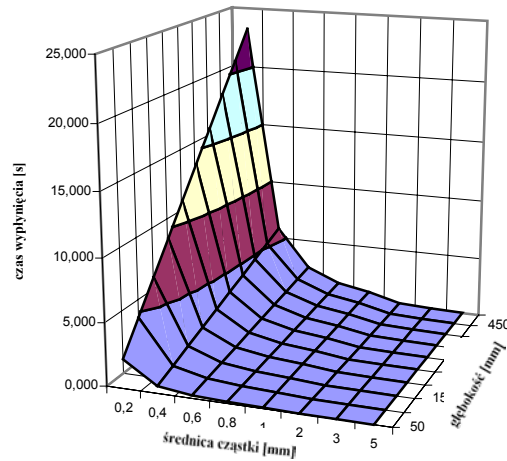
gdzie: g - przyspieszenie ziemskie, d – średnica cząstki, γ_1 – gęstość ciekłego metalu, γ_2 – gęstość cząstek, η - lepkość dynamiczna.

Istotne jest aby cząstka wprowadzona do kąpielii metalowej przed wypłynięciem na powierzchnię uległa rozpuszczeniu. Wtedy efektywność wykorzystania węgla będzie najwyższa. Korzystając z powyższej zależności można określić czas wpływania cząstki znajdującej się na określonej głębokości H . Istotny wpływ na ten parametr będzie posiadała lepkość dynamiczna. W stopach żelaza z węglem może ona się zmieniać w zakresie 4,00- 10,25 mPa s [5]. W tabeli 1 i na rys. 2 przedstawiono wyniki obliczeń czasu wpływania cząstek o średnicach 0,2 – 5 mm, zanurzonych na głębokości 50 – 500 mm. Przyjęto lepkość dynamiczną $\eta = 5,41 \text{ Ns/m}^2$ (dla temperatury 1400 °C i zawartości węgla 2,07 %).

Tabela 1. Czas wpływania cząstek
Table 1. Time of particles outflow

H	d	0,2	0,5	1	2	3	5
50		2,324	0,581	0,093	0,023	0,010	0,004
100		4,647	1,162	0,186	0,046	0,021	0,007
150		6,971	1,743	0,279	0,070	0,031	0,011
200		9,294	2,324	0,372	0,093	0,041	0,015
250		11,618	2,904	0,465	0,116	0,052	0,019
300		13,941	3,485	0,558	0,139	0,062	0,022
350		16,265	4,066	0,651	0,163	0,072	0,026
400		18,588	4,647	0,744	0,186	0,083	0,030
450		20,912	5,228	0,836	0,209	0,093	0,033
500		23,235	5,809	0,929	0,232	0,103	0,037

Czas wypłynięcia cząstki dla $\eta=5,41$; $T=1400^{\circ}\text{C}$; $C=2,07\%$

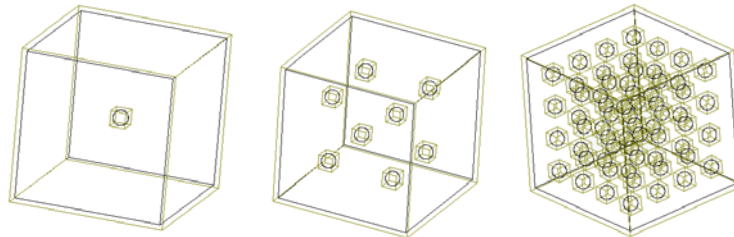


Rys. 1. Czas wypływania cząstek.
Fig. 1. Time of particles outflow.

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że zwiększanie średnicy cząstki powoduje wzrost ich prędkości, a w konsekwencji skrócenie czasu wypływania. Zmniejszanie lepkości będzie powodowało zwiększenie prędkości wypływania cząstek.

3. MODELOWANIE PROCESU NAGRZEWANIA CZĄSTEK

W programie SolidWorks zostało wykonanych 18 wzorców sześciianów z ciecżą, w których znajdują się cząstki z grafitem. Ponadto zostało przygotowanych kolejnych 12 wzorców sześciianów z ciecżą, w których umieszczono pęcherze powietrza z cząsteczką grafitu w środku. Kształt wzorców został przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Sześciiany z ciekłego metalu, w których znajdują się cząstki grafitu odpowiednio: 1, 8, 64.
Fig. 2. Liquid metal cubes with graphite particles inside, accordingly: 1, 8, 64.

Cząstki grafitu zostały umieszczone symetrycznie w sześciangach. Założono wielkości cząstek o średnicach: 0,2, 0,5, 1, 2, 3 i 5 mm. Natomiast pęcherze powietrza miały następujące średnice: 10, 15 i 20 mm. We wnętrzu pęcherza znajdowała się cząstka grafitu o średnicach podanych powyżej.

Wymiary sześciangu z ciekłym metalem wynosiły dla cząstek o średnicy 0,2 i 0,5 mm: 10×10×10 mm. Natomiast dla pozostałych średnic przyjęto wymiary sześciangu: 30×30×30 mm. Część badań przeprowadzono na ¼ objętości sześciangu. Zmiany w wielkości sześciangu zastosowano w celu ograniczenia czasu obliczeń. Jako materiał ciekłego metalu przyjęto żeliwo szare o temp. 1260⁰C i 1400⁰C, z tym, że dla pęcherzy powietrza zastosowano tylko temp. 1400⁰C. Między otoczeniem, a ciekłym metalem zastosowano izolację doskonałą w celu uzyskania braku straty ciepła podczas nagrzewania. Oprócz tego zastosowano idealny kontakt grafitu z ciekłym metalem. Następnie przy użyciu programu NovaFlow&Solid przeprowadzono symulację nagrzewania cząsteczki lub cząsteczek grafitu w celu uzyskania czasu nagrzewania zależnie od ilości cząstek i ich wielkości.

Tablica 2. Wyniki obliczeń czasu nagrzewania cząsteczki węgla w ciekłym metalu o temperaturze 1260⁰C i czasu wypływu

Table 2. Results of heating time of graphite particle in liquid metal with temperature 1260⁰C and its outflow time calculations.

Ilość cząstek	1	8	64
Średnica cząstki [mm]	Czas nagrzewania cząstki [s]		
	Czas wypływu cząstki z głębokości 50 i 500 mm [s] dla C=3,96%		
0,2	0,01	0,01	0,01
	3,741		37,408
0,5	0,034	0,035	0,036
	0,599		5,985
1	0,131	0,131	0,134
	0,15		1,496
2	0,483	0,489	0,382
	0,037		0,374
3	0,832	0,839	0,677
	0,017		0,166
5	2,223	2,543	1,076
	0,006		0,06

Głównym etapem pracy była symulacja numeryczna procesu nagrzewania cząstki grafitu wprowadzonej do ciekłego metalu. Prowadzone analizy nagrzewania cząsteczek służą określeniu, jaka powinna być średnica i głębokość zanurzenia cząstki, aby przed wypłynięciem na powierzchnię zdążyła się ona rozpuścić. W tym celu wewnątrz cząsteczki grafitu został umieszczony wirtualny termoelement. Dzięki niemu określono

czas nagrzewania cząstki. W tabelach 2 i 3 przedstawiono przykładowe czasy nagrzewania i wypływania cząstek.

Tablica 3. Wyniki obliczeń czasu nagrzewania cząsteczki węgla w ciekłym metalu o temperaturze 1400°C i czasu wypływania

Table 3. Results of heating time of graphite particle in liquid metal with temperature 1400°C and its outflow time calculations.

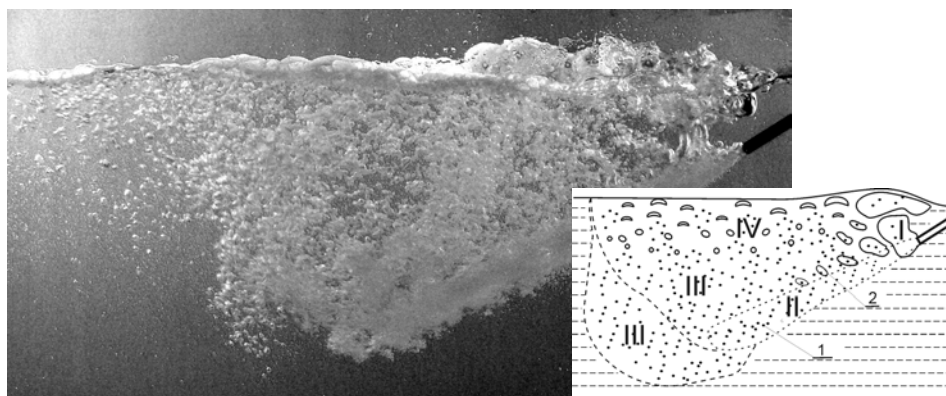
Ilość cząstek	1	8	64
Średnica cząstki [mm]	Czas nagrzewania cząstki [s] Czas wypływu cząstki z głębokości 50 i 500 mm [s] dla C=3,96%		
1	0,123	0,127	0,124
	0,108		1,084
2	0,442	0,442	0,467
	0,027		0,271
3	0,766	0,766	0,615
	0,012		0,12
5	1,704	1,785	0,962
	0,004		0,043

4. NAGRZEWANIE CZĄSTEK ZAMKNIĘTYCH W PĘCHERZACH

Autorzy przeprowadzili szereg badań modelowania fizycznego mających na celu określenie obrazu strumienia dwufazowego w ośrodku ciekłym w aspekcie wdmuchiwania proszków do kąpieli metalowej [6, 7, 8]. Na rys 3. przedstawiono przykładowy obraz strumienia dwufazowego. Wyróżnić w nim można pewne charakterystyczne strefy. Strefa I – bezpośrednio przy wylocie z lancy. W obszarze tym powstają duże pęcherze gazowe o nieregularnych kształtach. Ich wielkość i ilość jest zależna od natężenia przepływu gazu. Przy większych natężeniach znacznie szybciej będzie zachodziło ich odrywanie od krawędzi lancy, rozpad i powstawanie nowych. 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.

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. Należy przypuszczać iż proces wymiany masy będzie w tej strefie najbardziej intensywny. Wynika to z faktu, że cząstki posiadają znaczną prędkość i przez to grubość przypowierzchniowej warstwy

dyfuzyjnej będzie bardzo mała. Strefa III to obszar cząstek o najmniejszych wymiarach mających bezpośredni kontakt z ciekłym metalem. Jego powierzchnia będzie największa i należy przypuszczać, że decyduje ona o skuteczności procesu. Wielkość tego obszaru jest konsekwencją powstawania strefy II. Strefa IV to pęcherze gazowe o kształcie kuli, elipsoidy lub czaszy kulistej. Zależnie od miejsca powstania pęcherza i jego wielkości. Przesuwając się w kierunku powierzchni będzie malało.



Rys. 3. Kształt i obszary strumienia dwufazowego, 1 – cząstki nawęglacza, 2 – pęcherze gazowe.
Fig. 3. Shape and areas of diphase stream, 1 – carburizer particles, 2- gas bubbles.

W przypadku ciekłego metalu dodatkowo będą się one nagrzewały i zwiększały swoją objętość. Ich pęknięcie nastąpi tuż pod lub na powierzchni lustra metalu i część cząstek zostanie tam wyniesiona. Wewnątrz tych pęcherzy mogą zostać zamknięte cząstki nawęglacza i wymiana masy nastąpi po ich rozerwaniu pod powierzchnią ciekłego metalu, co znacznie obniży efektywność całego procesu.

Dlatego przeprowadzono również symulację nagrzewania cząstek zamkniętych wewnątrz pęcherzy gazowych. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.

Tablica 4. Wyniki obliczeń czasu nagrzewania cząsteczki węgla znajdującej się w pęcherzu powietrza

Table 4. Results of heating time of graphite particle located in air bubble calculations.

Średnica pęcherza powietrza [mm]	10	15	20
Średnica cząstki [mm]	Czas nagrzewania cząstki [s]		
1	97	156	205
2	189	275	373
3	239	374	489
5	302	515	—

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Łącznie przeprowadzono 42 symulacje. W eksperymentach, których wyniki były przedmiotem analizy niniejszej pracy uzyskano czasy nagrzewania cząsteczek w temp. 1260⁰C i 1400⁰C oraz cząstek zamkniętych w pęcherzach powietrza. Czas nagrzewania zmieniał się od 0,01 do 2,543 s dla cząsteczek w bezpośrednim kontakcie z ciekłym metalem oraz od 97 do 515 s dla cząsteczek zamkniętych w pęcherzach powietrza. Rozpiętość uzyskanych wyników jest tak duża, ponieważ w prowadzonych symulacjach zmieniano w szerokim zakresie parametry cieczy (temperatura) i nawęglacza (średnica cząstek). Cząstki nagrzewane w temp. 1260⁰C, powyżej średnicy 1 mm nie zdążą się nagrzać przed wypłynięciem na powierzchnię.

Nagrzewanie cząstek w otoczeniu pęcherza powietrza powoduje znaczne wydłużenie czasu nagrzewania. Jest to spowodowane tym, że powietrze stanowi o wiele lepszą izolację termiczną od powłoki węgla. Dodatkowo mniejsza gęstość powietrza będzie powodowała większą prędkość wypływu cząsteczki na powierzchnię.

W prowadzonych badaniach czasu nagrzewania dużej ilości cząstek stwierdzono, że powodowały one znaczny spadek temperatury cieczy. Było to widoczne w symulacji sześćdziesięciu czterech cząstek o średnicy 5 mm, gdzie temperatura spadła o przeszło 100⁰C. Dlatego cząstki o tej samej średnicy po nagraniu się wykazują niższą temperaturę.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

- Cząstki o średnicach poniżej 1mm nagrzeją się do założonej temperatury przed ich wypłynięciem. Oznacza to, że ulegną rozpuszczeniu w kąpeli metalowej i efektywność procesu nawęglania będzie w tym przypadku wysoka.
- Cząstki o średnicach powyżej 1mm nie zdążą się nagrzać przed wypłynięciem na powierzchnię. Powierzchnia styku faz będzie po wypłynięciu bardzo mała (pow. lustra ciekłego metalu), stąd współczynnik wymiany masy będzie mały.
- Przy wprowadzaniu dużej ilości cząstek temperatura metalu znacznie spada i cząsteczki nie osiągają założonej temperatury. W praktyce oznacza to, że stosowanie zbyt dużego natężenia przepływu materiału będzie powodowało spadek efektywności procesu.
- Wprowadzenie cząstek do wnętrza pęcherza powietrza umieszczonego w ciekłym metalu powoduje bardzo znaczne wydłużenie czasu nagrzewania. Prowadzi to do wypłynięcia cząsteczki na powierzchnię przed pełnym jej nagraniem, a w konsekwencji do zmniejszenia efektywności nawęglania. To niekorzystne zjawisko można ograniczyć doprowadzając do zmniejszenia wielkości pęcherzy na wylocie lancy. Można to osiągnąć zwiększając natężenie przepływu gazu nośnego.

LITERATURA

- [1] Kanafek M, Homa D, Janerka K.: Nawęglanie żeliwa w Odlewni TEKSID Poland S. A. za pomocą urządzenia pneumatycznego POLKO, Przegląd Odlewnictwa, 1999, nr 7.
- [2] K. Janerka: Czynniki wpływające na parametry procesu pneumatycznego nawęglania, Proceedings of the Thrid Scientific Conference Materiale Mechanical and Manufacturing Engineering M3E, 2005, s. 531-536.
- [3] K. Janerka, D. Bartocha, J. Szajnar: Carburization effectiveness of synthetic cast iron producing in inductive furnaces, The 11th International Scientific Conference on the Contemporary Achievements in Mechanics, Manufacturing and Materials Science CAM3 S 2005, Mat na CD, nr 1.192.
- [4] Wróblewski A, Zakrzewski J., Wstęp do fizyki, PWN, Warszawa, 1984.
- [5] Podzucki Cz., Żeliwo - Struktura właściwości, zastosowanie, Tom drugi, Wyd. ZG STOP Kraków 1991.
- [6] Janerka K., Jura S., Jezierski J., Szlumczyk H., Analiza strumienia dwufazowego w procesie wdmuchiwania proszków, Archiwum Odlewnictwa, rocznik 4 nr 14, PAN 2004, s. 189-196.
- [7] Janerka K., Wpływ parametrów pneumatycznego wdmuchiwania i własności cząstek na zasięg strumienia. Archiwum Odlewnictwa, vol. 3, Nr 9, s.252-259, PAN Katowice, 2003.
- [8] Janerka K., Gawroński J., Jezierski J. Powierzchnia strumienia dwufazowego w procesie wdmuchiwania proszków. Archiwum Odlewnictwa, PAN Katowice, 2004, vol 4, nr 14, str. 189-196.

HEATING OF GRAPHITE PARTICLES IN LIQUID METAL**SUMMARY**

In article attempt of analysis a carbon particles dissolution in liquid metal have been made. Especially attention was taken to time of particles heating. The comparison of heating time and outflow on liquid metal surface time has been carried out. It was made for determination of optimal particles size for assurance the maximum range of carbon assimilation from carburizer.

Recenzował Prof. Józef Gawroński