

Mirosław Cholewa^{1*}, Bolesław Formanek²

¹Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład Odlewnictwa
ul. Towarowa 7, 44-100 Gliwice, Poland

²Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej, Katedra Nauki o Materiałach, ul. Krasińskiego 8, 40-018 Katowice, Poland

* Corresponding author. E-mail: miroslaw.cholewa@polsl.pl

Otrzymano (Received) 12.03.2008

TECHNICZNE ASPEKTY WYTWARZANIA ODLEWÓW KOMPOZYTOWYCH METODĄ WYTAPIANYCH MODELI

Przedstawiono techniczne ograniczenia i potencjalne możliwości stosowania metody wytapianych modeli do wytwarzania dyspersyjnych odlewów kompozytowych. W badaniach posłużono się odlewem próbnym w postaci samochodowej, wentylowanej tarczy hamulcowej o gabarytach $\varnothing(255/123)\times 22$ mm. Posłużono się kompozytami wytworzonymi na osnowie stopu aluminium EN AC- AlSi11 . W odlewach próbnych zastosowano podwójne wzmocnienie cząstkami metalicznymi i ceramicznymi. Zasadniczą funkcję wzmacniającą pełniły metaliczne cząstki $(\text{CrFe25C10})_p$ o ziarnistości 0,4 mm, stanowiąc klasyczne wzmocnienie *ex-situ* generujące w założeniu korzystne cechy trybologiczne wywołane obecnością węglików chromu. Funkcję dodatkowego, drobnodispersyjnego wzmocnienia pełniły fazy $(\text{Cr}_3\text{C}_2)_p$, $(\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC})_p$ zawarte w osobno wprowadzanych kompozytowych proszkach. Proszki z drobnodispersyjnymi fazami węglikowymi (chromu i chromu wraz z tytanem) uzyskano przez zastosowanie technik metalurgii proszków. Innym rodzajem oddzielnego, dodatkowego wzmocnienia były tlenki - głównie $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p$, pochodzące z obróbki ozonem ciekłej osnowy. Wytworzono ciekłe zawiesiny kompozytowe o sumarycznej zawartości wzmocnienia powyżej 40% wag. Zawiesiny odlewano do samonośnych form wykonanych metodą wytapianych modeli. Proces wypełniania wnętrza formy, z uwagi na znaczną lepkość i niską lejność zawiesin, wspomagano poprzez zewnętrzne oddziaływanie na formę lub wewnętrzne oddziaływanie na metal. Potwierdzono skuteczność wspomaganie wypełniania wnętrza formy przez stosowanie wibracji mechanicznych i liniowego rewersyjnego pola elektromagnetycznego.

Słowa kluczowe: kompozyt, MWM, wibracja, pole elektromagnetyczne

TECHNICAL ASPECTS OF COMPOSITE CASTING PRODUCTION WITH LOST WAX METHOD

In this work technical limits and potential possibilities of using lost wax method for dispersion composite castings production were presented. For investigations as a test casting the car ventilated brake disc with dimension $\varnothing(255/123)\times 22$ mm was used. Composites made of aluminium alloy EN AC- AlSi11 as matrix were tested. In tested castings double reinforcement was used with both ceramics and metallic particles. Metallic particles $(\text{CrFe25C10})_p$ with granularity 0.4 mm fulfilled fundamental reinforcing function, are classic *ex-situ* reinforcement which generates profitable tribological features caused by chromium carbide presence. Function of additional, fine-dispersion reinforcing fulfilled $(\text{Cr}_3\text{C}_2)_p$, $(\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC})_p$ phases which were separately inserted composite powder content. Powders with fine-dispersion carbide phases (chromium and chromium with titanium) have been obtained by powder metallurgy techniques. The other kind of separately, additional reinforcement were oxides mainly $(\text{Al}_2\text{O}_3)_p$, originating in liquid matrix treatment with ozone. Liquid composite suspensions with total content of reinforcement over 40% wt. were produced. Suspensions were poured to self-supporting moulds made with lost wax technology. Pouring process regarding significant viscosity and low castability of suspensions was aided by external influence on mould or internal influence on metal. Effectiveness of mould cavity pouring process aided by mechanical vibration and linear reversing electromagnetic field was confirmed.

Keywords: composite, LWP, vibration, electromagnetic field

WPROWADZENIE

Wytwarzanie odlewanych elementów kompozytowych o rozbudowanej postaci geometrycznej wymaga stosowania skomplikowanych geometrycznie form. Może się to odnosić zarówno do samej wnętrza formy, jak i do wnętrza wraz z układem: wlewowym i zasilania. Niekorzystna lejność ciekłych kompozytów [1-4]

w porównaniu do tradycyjnych stopów odlewniczych [5-7] (nawet do 40% [2, 8]) znacznie ogranicza możliwości stosowania typowych technik odlewania. Same badania lejności klasycznymi metodami, np. próby spiralnej, dają często wyniki obarczone znacznym odchyleniem standardowym. Trudność pomiaru wynika

między innymi ze złożoności procesu płynięcia [2-4], co w konsekwencji wskazuje na konieczność opracowania specjalnych, być może indywidualnych, metod badania lejności dla różnych, ciekłych kompozytów. Także w tym zakresie analizy symulacyjne odnoszą się głównie do tradycyjnych stopów odlewniczych [9-13]. Pewną alternatywą jest poszukiwanie metod zwiększania skuteczności wypełniania wnęki formy ciekłym kompozytem. Opracowanie w głównej mierze stanowi próbę odpowiedzi na pytanie: jakie technologiczne zabiegi mogą zniwelować trudności w odlewaniu ciekłych dyspersji kompozytowych?

W większości, wytwarzane wspólnie kompozyty należą do grupy materiałów odpornych na zużycie, cechujących się dużym współczynnikiem tarcia [14-17]. Są to materiały szczególnie trudno obrabialne. W takich przypadkach w celu minimalizacji lub eliminacji obróbki skrawaniem konieczne jest stosowanie np. metod precyzyjnego odlewania.

Podjęte badania mają na celu sprawdzenie koncepcji wykonania typowego odlewu technicznie użytecznego o znacznie skomplikowanej geometrii w technice precyzyjnego odlewania wraz z weryfikacją sposobów wspomagania etapu zapełniania wnęki formy, ale także krystalizacji odlewu.

TECHNICZNA I MATERIAŁOWA KONCEPCJA WYKONANIA KOMPOZYTOWYCH ODLEWÓW TARCZ HAMULCOWYCH

Założono wykonanie odlewu metodą najczęściej stosowaną w odlewnictwie precyzyjnym - to jest metodą wytapianych modeli woskowych. Ponadto przeprowadzono weryfikację dwóch sposobów wspomagania procesu zalewania. Wspomaganie w założeniu powinno spowodować intensyfikację względnego ruchu między ściankami formy a ciekłą zawiesiną. W obu rozważanych przypadkach cechą charakterystyczną ruchu jest oscylacja, wywołująca naprężenia ścinające na granicy kontaktu zawiesina-forma. Założono korzystny wpływ zmiennych naprężeń ścinających na rewitalizację strugi ciekłego kompozytu wypełniającego wnękę formy. Według pierwszego sposobu, forma jest poddawana mechanicznej wibracji podczas zalewania. Drugi sposób polega na wprawianiu w oscylacyjny, liniowy ruch ciekłej zawiesiny kompozytowej za pomocą pola elektromagnetycznego. W przypadku wibracji mechanicznej istotnym ograniczeniem stosowania jest niewielka wytrzymałość formy malejąca wraz z postępującym wypełnianiem wnęki ciekłym kompozytem. W badaniach użyto trudniejszego w realizacji wariantu z formą samonośną. Przy wspomaganie za pomocą pola elektromagnetycznego istotnym ograniczeniem sposobu jest geometryczna konfiguracja pola, obejmującego skutecznym zasięgiem działania niecałkowitą objętość odlewu. W odlewach typu tarcza zaproponowano zasto-

sowanie liniowego pola rewersyjnego, zakładając jego oddziaływanie na ciekły kompozyt tylko w dolnej części formy. W obu przypadkach założono poziome położenie odlewów próbnych tarcz w formach.

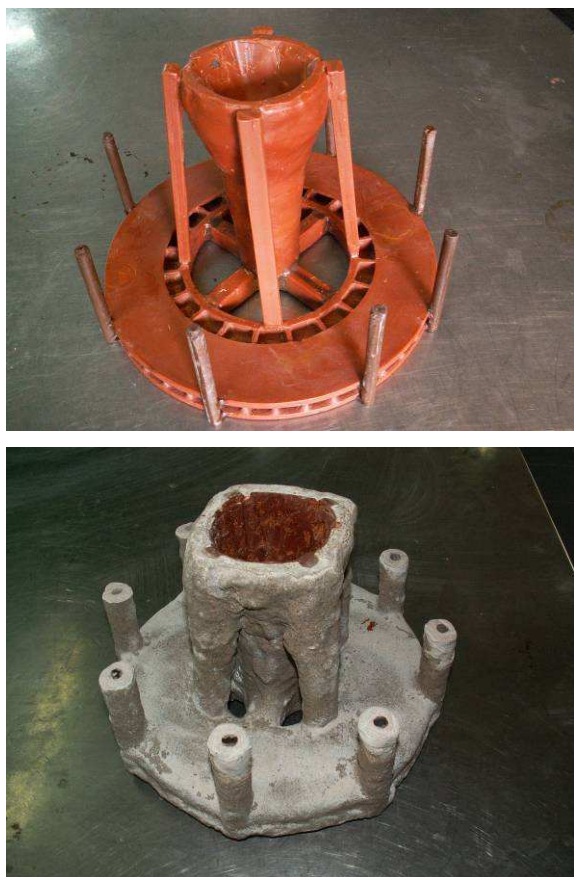
W koncepcji materiałowej, będącej przedmiotem zgłoszenia patentowego, zastosowano podwójne wzmocnienie, które ze względu na zróżnicowanie wymiarów faz wzmacniających powinno zapewnić jednocześnie korzystne własności wytrzymałościowe i trybologiczne. Do osnowy wprowadzono kompozytowe proszki podane w tabeli 1.

TABELA 1. Proszki wprowadzane do ciekłej osnowy EN AC- AlSi11 , zawierające drobnodispersyjne fazy wzmacniające

TABLE 1. Powders containing fine-dispersion phases reinforcing composite introduced into liquid matrix of EN AC- AlSi11 alloy

Osnowa 75% wag.	Faza wzmacniająca 25% wag.	Ziarnistość proszku μm	Udział masowy proszku w stosunku do stopu osnowy EN AC- AlSi11 % wag.
FeCr	TiC	45÷90	20
NiCr	Cr_3C_2	20÷45	18
NiCr	Cr_3C_2 TiC	20÷56	23

Alternatywnym sposobem wytworzenia drobnodispersyjnych faz - głównie Al_2O_3 - była gazowa obróbka kąpielii stopu EN AC- AlSi11 ozonem (O_3). Następnie do tak wytworzonego kompozytu w stanie ciekłym wprowadzano metaliczne cząstki $(\text{CrFe25C10})_p$ o ziarnistości 0,4 mm w ilości 20% wag. Wszystkie komponenty wzmacniające aktywowano powierzchniowo związkami boru i sodu. Do wykonania form zastosowano jako osnowę mączkę i piasek cyrkonitowy o ziarnistości z zakresu 0,06÷0,16 mm. Jako spoiwo 7-warstwowych form zastosowano zhydrolizowany krzemian etylu. Funkcję układu zalewania i zasilania pełnił układ nie w pełni sprężający. Wymiary przekrojów elementów układu wlewowego oraz objętość zbiornika wlewowego zwiększono w stosunku do zasad obowiązujących dla stopu eutektycznego osnowy odpowiednio o 20 i 25%. Zastosowano również stożkowy wlew główny o 6° zbieżności. Na rysunku 1 pokazano przykładowo zespół modelowy wraz z formą. Kompozyty wlewano do form w warunkach cieplnych, zgodnych z ogólnie przyjętymi zasadami dla stopów Al-Si. Na rysunku 1 pokazano woskowy zespół modelowy oraz samonośną formę. Odlewy próbne wykonano, zalewając formy w tradycyjny sposób (tj. bez wspomaganie) oraz stosując oba sposoby wspomagające wypełnianie wnęki formy. W obu przypadkach czynnikami zmiennymi w badaniach były elektryczne parametry prądu zasilającego wibrator i wzbudnik pola elektromagnetycznego (PEM): napięcie, natężenie prądu oraz w przypadku pola EM częstotliwość rewersji.



Rys. 1 Woskowy zespół modelowy oraz samonośna forma
Fig. 1. Wax pattern equipment and self-supporting mould

WYNIKI BADAŃ

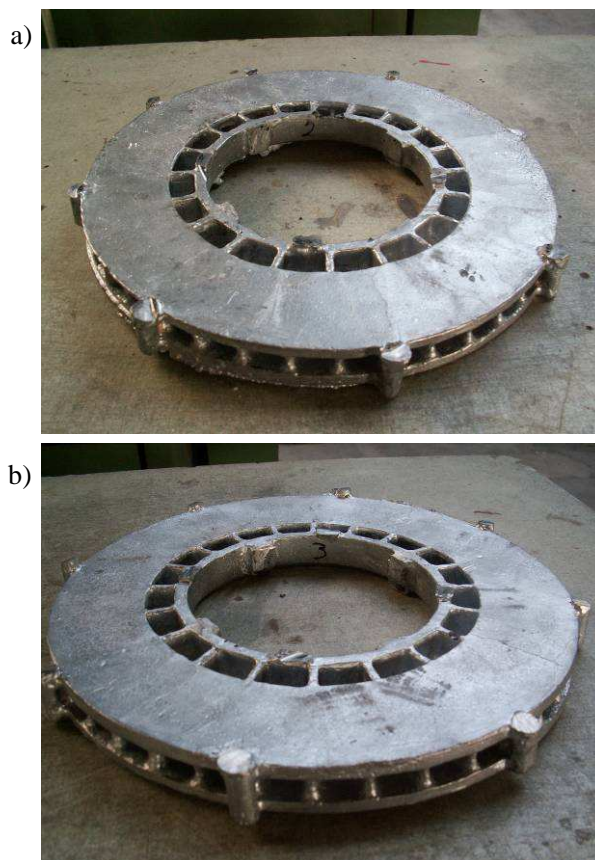
Na podstawie przeprowadzonych badań uzyskano odlewy próbne całkowicie wypełniające wnętrza form oraz odlewy „niedolane”. Za bardzo dobre uznano odlewy z odtworzonymi wszystkimi elementami układu wlewowego. W ocenie stopnia wypełnienia posłużono się objętością odlewu próbnego wraz z przelewami, lecz bez uwzględniania objętości wlewu głównego i zbiornika wlewowego.

W badanych warunkach objętość wadliwych odlewów wykonanych bez wspomaganie mechaniczną wibracją i polem magnetycznym stanowiła 32÷67% całkowitej objętości odlewów dobrych. W odlewach uzyskanych ze wspomaganie stwierdzono różną wysokość zapełnienia skrajnych przelewów - nawet w odniesieniu do przelewów w poszczególnych odlewach. Przy korzystnie dobranych parametrach wspomaganie ciekły kompozyt przelał się przez górną krawędź wszystkich przelewów. Różnica wysokości poziomu zbiornika i przelewów w przyjętych warunkach technologicznych wynosiła ~120 mm. Zastosowano pole elektromagnetyczne o indukcji na powierzchni odlewu 20÷50 mT, przy częstotliwości rewersji 0,5 Hz oraz wibrację o amplitudzie drgań poziomych i pionowych równej 2 mm, przy częstotliwości 6 Hz. Z usuniętych elementów układu wlewowego wykonano próbki do

badań strukturalnych odlewów próbnych. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe kompozytowe odlewy próbne. Rysunki 2a i b obrazują wykonane kompozytowe odlewy, odpowiednio:

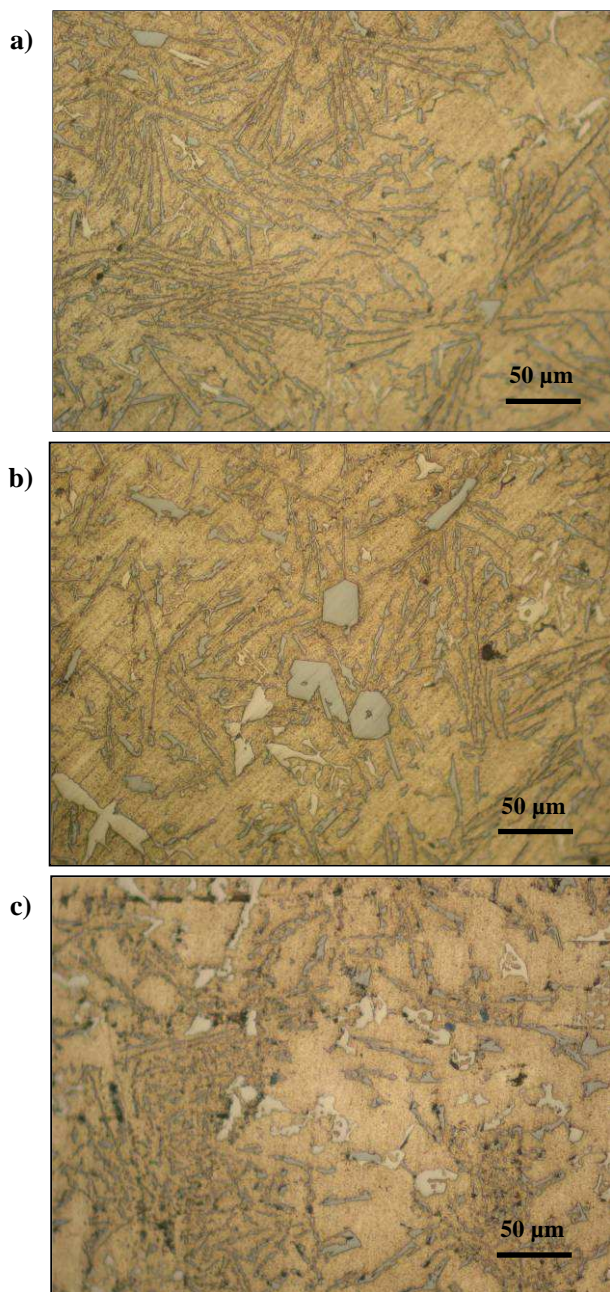
- $\text{AlSi11}+(\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC})_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie liniowego, rewersyjnego pola elektromagnetycznego (LRPEM);
- $\text{AlSi11}+(\text{Cr}_3\text{C}_2)_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie mechanicznej wibracji (MW).

Przeprowadzona optyczna analiza metalograficzna potwierdza obecność spodziewanych składników strukturalnych. Na tle roztworu α krzemu w aluminium widoczne są szare wydłużone wydzielenia krzemu eutektycznego i jasne nieregularne cząstki $(\text{CrFe25C10})_p$ oraz ciemne równoosiowe, drobnodispersyjne cząstki - prawdopodobnie węglików $(\text{Cr}_3\text{C}_2)_p$ pochodzące z proszków kompozytowych. W porównaniu do kompozytu $\text{AlSi11}+(\text{Al}_2\text{O}_3)_p+(\text{CrFe25C10})_p$ widoczny jest słabszy efekt modyfikacji. Drobnodispersyjne cząstki stanowią często zarodki krystalizacji krzemu eutektycznego o charakterystycznej budowie promieniowej.



Rys. 2. Przykładowe uzyskane kompozytowe odlewy próbne:
a) $\text{AlSi11}+(\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC})_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie liniowego, rewersyjnego pola elektromagnetycznego (LRPEM);
b) $\text{AlSi11}+(\text{Cr}_3\text{C}_2)_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie mechanicznej wibracji (MW)

Fig. 2. Examples of obtained test composite castings:
a) $\text{AlSi11}+(\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC})_p+(\text{CrFe25C10})_p$ aided with linear reversing electromagnetic field (LRPEM);
b) $\text{AlSi11}+(\text{Cr}_3\text{C}_2)_p+(\text{CrFe25C10})_p$ aided with mechanical vibrations (MW)



Rys. 3. Przykładowe mikrografie kompozytów: a) $\text{AlSi11}+(\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC})_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie LRPEM; b) $\text{AlSi}+(\text{Cr}_3\text{C}_2)_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie MW; c) $\text{AlSi11}+(\text{Al}_2\text{O}_3)_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie LRPEM; pow. 200x

Fig. 3. Example of composites microstructure: a) $\text{AlSi11}+(\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC})_p+(\text{CrFe25C10})_p$ LRPEM aided; b) $\text{AlSi}+(\text{Cr}_3\text{C}_2)_p+(\text{CrFe25C10})_p$ MW aided; c) $\text{AlSi11}+(\text{Al}_2\text{O}_3)_p+(\text{CrFe25C10})_p$, LRPEM aided

W strukturze występują pojedynczo drobnodyspersyjne cząstki oraz w postaci skupisk zawierających kilka cząstek. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe mikrografie kompozytów:

- $\text{AlSi11}+(\text{Cr}_3\text{C}_2+\text{TiC})_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie LRPEM;
- $\text{AlSi}+(\text{Cr}_3\text{C}_2)_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie MW;
- $\text{AlSi11}+(\text{Al}_2\text{O}_3)_p+(\text{CrFe25C10})_p$ ze wspomaganie LRPEM.

PODSUMOWANIE

Uzyskane wyniki badań potwierdzają efektywność proponowanych zabiegów technologicznych w zastosowaniu do ciekłych dyspersji o znacznym udziale komponentów wzmacniających i znacznym skomplikowaniu postaci geometrycznej odlewu. Koncepcja także może być wykorzystana w odniesieniu do innych technik odlewania różnych kompozytów z cząstkami wzmacniającymi. W opinii autorów generowanie ruchu w szczególności w ciekłej dyspersji podczas zalewania i krystalizacji może sprzyjać homogenizacji komponentów i kształtowaniu struktury osnowy kompozytu. W wyniku przeprowadzonych badań sformułowano następujące technologiczne uwagi:

- Zastosowanie cyrkonitowej osnowy w metodzie wytapianych modeli może ograniczać segregację komponentów.
- W zależności od własności reologicznych ciekłej dyspersji wskazany jest indywidualny dobór układu wlewowego i parametrów wspomaganie procesu odlewania kompozytu.
- Ze względów technologicznych uzasadnione jest stosowanie cząstek o minimalnej, zbliżonej ziarnistości, co poprawia powtarzalność i prognozowanie procesu płynięcia zawiesiny - niezależnie od jej lepkości i lejukości.
- Wskazane jest przeprowadzenie ilościowej analizy wpływu wymuszonego ruchu ciekłej dyspersji kompozytowej na wypełnianie i kinetykę krzepnięcia osnowy kompozytu.
- Wskazane jest opracowanie parametrów skutecznego odgazowania drobnodyspersyjnej zawiesiny w celu maksymalnej poprawy jej własności reologicznych.

Przeprowadzone badania pozwoliły ponadto na sformułowanie następujących wniosków:

1. Potwierdzono przydatność metody wytapianych modeli w zastosowaniu do wytwarzania technicznie użytecznych, trudno obrabialnych elementów odlewanych z wysokolepkich zawiesin kompozytowych.
2. Potwierdzono skuteczność wspomaganie procesu wypełniania wnęki formy wysokolepkimi zawiesinami kompozytowymi za pomocą mechanicznej wibracji i pola elektromagnetycznego.
3. Dla użytych w badaniach kompozytów i warunków odlewania wyznaczono technologiczne parametry wspomaganie procesu zapełniania wnęki formy zapewniające właściwy jego przebieg. Są nimi: pole elektromagnetyczne o indukcji na powierzchni odlewu 20÷50 mT, przy częstotliwości rewersji 0,5 Hz oraz wibracje o amplitudzie drgań poziomych i pionowych równej 2 mm, przy częstotliwości 6 Hz.
4. Potwierdzono możliwość skutecznego generowania oscylacyjnego ruchu względnego formy oraz wlewano do formy kompozytu przez sterowanie parametrami elektrycznymi badanych urządzeń wspomaganających.

LITERATURA

- [1] Śleziona J., Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, 47, Gliwice.
- [2] Konopka Z., Grawitacyjne i ciśnieniowe odlewanie kompozytów na osnowie stopów Al z cząstkami SiC i grafitu, Innowacje w Odlewnictwie, 1, Kraków 2007, 199-207.
- [3] Sobczak J., Metal Composites, Kraków-Warszawa 2001.
- [4] Konopka Z., Cisowska., Lejność kompozytów na osnowie stopów AlMg10 z cząstkami SiC, Arch. Odlewn. 2003, 3, 9, 293-298.
- [5] Mutwil J., Podstawowe typy przepływu metali w formach odlewniczych na przykładzie stopów aluminium, Arch. Technol. Masz. i Autom. 1998, 18, 221-231.
- [6] Mutwil J., Bydałek A., Niedźwiecki D., Stan obecny i perspektywy rozwoju badań nad lejnością metali i stopów, Krzepn. Met. i Stop. 1998, 37, 53-58.
- [7] Mutwil J., Janowski R., Cechy przepływu siluminów jednofazowych w kanałach metalowych form odlewniczych, Arch. Odlewn. 2001, 1, 2/2, 257-262.
- [8] Konopka Z., Cisowska M., Ocena płynięcia ciekłego stopu AlMg10 w spiralnej próbie lejności, Arch. Odlewn. 2002, 2(4), 135-140.
- [9] Bokota A., Parkitny R., Elastic-plastic states in solidifying casting, Arch. Mech. 1991, 43 (2-3), 249-269.
- [10] Parkitny R., Bokota A., Sowa L., Modelowanie numeryczne krzepnięcia odlewu z uwzględnieniem procesu wypełniania wnęki formy, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1998, Mechanika 6, 287-292.
- [11] Bokota A., Sowa L., Zastosowanie metody elementów skończonych do modelowania próby lejności, Arch. Odlewn. 2001, 1 (2/2), 42-47.
- [12] Sowa L., Bokota A., Model krzepnięcia stopu dwuskładnikowego w pionowej próbie lejności, Arch. Odlewn. 2003, 3(10), 193-198 (in Polish).
- [13] Dhatt G., Gao D.M., Finite element simulation of metal flow in moulds, Int. J. Num. Meth. in Engrg. 1990, 30, 821-831.
- [14] Dobrzański L.A., Kremzer M., Nowak A.J., Nagel A., Composite materials based on porous ceramic preform infiltrated by aluminium alloy, J. AMME 2007, 20, 95-98.
- [15] Dobrzański L.A., Kremzer M., Nagel A., Huchler B., Composite materials based on the porous Al₂O₃ ceramics infiltrated with the EN AC-AlSi12 alloy, Kompozyty (Composites) 2005, 4a, 35-41.
- [16] Baron C., Bartocha D., Gawroński J., Thermal simulation of process formation composite laser on model casting, J. AMME 2006, 18, 51-54.
- [17] Myalski J., Wieczorem J., Tribological properties of heterophase composites with an aluminium matrix, J. AMME 2006, 15, 53-57.