

# Wpływ ciężaru cząsteczkowego i ilości glikolu polietylenowego na właściwości mas lejnych z SiC

DR INŻ. PAWEŁ WIŚNIEWSKI, MGR INŻ. WOJCIECH ANTOSIEWICZ,  
DR INŻ. RYSZARD SITEK, PROF. DR HAB. INŻ. JAROSŁAW MIZERA

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

dr inż. Paweł Wiśniewski



Pracownik Zakładu Projektowania Materiałów Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Swoją aktywność zawodową koncentruje na zagadnieniach związanych z: różnymi technikami formowania materiałów np. metodą odlewania precyzyjnego i prasowania, zastosowaniem dodatków polimerowych do proszków, mas lejnych i materiałów ceramicznych, projektowaniem, otrzymywaniem i charakteryzacją ceramicznych materiałów gęstych, porowatych, kompozytowych i nanomateriałów do różnych zastosowań technicznych, nanotechnologią oraz eksploatacją złóż gazu łupkowego.  
e-mail: pawel.wisniewski@pw.edu.pl

## Wstęp

Technika odlewania precyzyjnego stosowana we współczesnym lotnictwie daje możliwość wytwarzania detali o skomplikowanych kształtach. Jest to metoda skomplikowana, składająca się z wielu etapów. Pierwszym z nich jest zaprojektowanie i wytworzenie modeli woskowych, które kształtem i wymiarami będą odzwierciedlały otrzymany detal [1–2]. Następnie, modele woskowe łączone są z belką oraz misą wlewową w zestaw modelowy. Równoległe przygotowane zostają dwie lejne masy formierskie: na warstwę przymodelową oraz na warstwy konstrukcyjne. W tych ostatnich zostanie zanurzony zestaw modelowy i potraktowany posypką proszkową o gradacji większej niż materiał fazy stałej masy lejnej. Forma ceramiczna w zależności od procesu technologicznego i zastosowania, składa się z kilku warstw mieszanki oraz posypki [3–4]. Ostatnim procesem wytwarzania formy są procesy wytapiania, wygrzewania i wypalania. Zestaw zostaje włożony do autoklawu, gdzie pod wpływem temperatury wosk zostaje wytopiony. Wyjętą z autoklawu formę poddaje się następnie wygrzewaniu. Proces ten zazwyczaj prowadzony jest w temperaturach 700–900 °C, co powoduje zespolenie cząstek proszku ceramicznego oraz usunięcie dodatków organicznych zawartych w masie lejnej. Ostatnim procesem obróbki termicznej jest spiekanie w temperaturze 1000–1500 °C, co kształtuje końcowe właściwości formy [5–6].

Następnym krokiem jest zalewanie formy ciekłym metalem. Zalewanie odbywa się metodą grawitacyjną lub pod niskim ciśnieniem. Wprowadzony do formy metal zaczyna początkowo krystalizować od ścianek, szybkość krystalizacji zależy w głównej mierze od przewodności cieplnej formy. Gdy cały układ uzyska temperaturę pokojową, forma zostaje rozbita, a powstały wyrób (odlew) trafia do badania i na linię obróbki wykańczającej. Na efekt końcowy ma wpływ:

- dokładność wytworzenia modelu woskowego;
- skład chemiczny, właściwości i sposób przygotowania mas lejnych;
- zastosowanie proszku posypki o odpowiedniej wielkości cząstek;

## STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mas formierskich z węgla krzemu przeznaczonych do otrzymywania elementów silników lotniczych metodą odlewania precyzyjnego. Całkowite stężenie fazy stałej w ceramicznych masach lejnych z SiC wyniosło 60% wag. Spoiwem konstrukcyjnym była nanodispersja polimerowo-ceramiczna zawierająca koloidalny  $Al_2O_3$ . Jako spoiwa modyfikujące zastosowano wodne roztwory glikolu polietylenowego (PGE) o ciężarach cząsteczkowych 6000, 10000 i 20000 g/mol, które dodawano w ilościach 5%, 10% i 15% wagowych w stosunku do proszku. Proszek SiC charakteryzowano pod względem: wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej i za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz składu fazowego i chemicznego za pomocą dyfraktometrów rentgenowskich XRD i XRF. Masy formierskie charakteryzowano pod względem: lepkości dynamicznej, czasu wypływu oraz adhezji do płyty (tzw. test płyty) i grubości warstwy. Pomiary te przeprowadzono przez 96 h w warunkach laboratoryjnych w temperaturze 21°C. Otrzymane wyniki pokazały, że masy lejne z SiC zawierające nanodispersję oraz PGE charakteryzują się obiecującymi właściwościami i mają szansę zostać zastosowane w odlewnictwie precyzyjnym.

## SUMMARY

### Effect of molecular weight and amount of PGE on SiC-based slurries

In the present paper properties of silicon carbide slurries in manufacturing shell moulds for investment casting of aircraft turbine elements were studied. Ceramic SiC slurries with a solid concentration of 60 wt. % were applied. As a structural binder nanodispersion containing colloidal  $Al_2O_3$  was used. The poly(ethylene glycol) (PGE) with molecular weight 6000, 10000 and 20000 g/mol as a rheological modifiers were added at different amount: 5, 10, 15 wt. %. Characterization of SiC powder were made by: grain size by laser diffraction, Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray diffraction (XRD, XRF) methods. The properties of ceramic slurries such as: relative and dynamic viscosity, plate (plate weight test) and wax adhesion were studied by a range of techniques. These measurements were taken in laboratory conditions by 96 hours at temperature 21°C. The results shows that SiC-based slurries, nanodispersion binder and PGE meet the investment casting requirements of aircraft turbine parts and had promising properties.

## SŁOWA KLUCZOWE

masy lejne, SiC, spoiwa, PGE, odlewanie precyzyjne, formy odlewnicze

## KEYWORDS

slurries, SiC, PEG, precision casting, shell molds

- odpowiednia obróbka termiczna form;
- parametry zalewania i stygnięcia formy;
- obróbka końcowa [6].

Wpływając odpowiednio na parametry wytwarzania, wpływamy na strukturę wytworzonego elementu, co przekłada się na jego właściwości użytkowe.

W niniejszej pracy jako głównego surowca użyto węgla krzemu z uwagi na jego interesujące właściwości termiczne i mechaniczne, tj. wysoką przewodność cieplną, dużą twardość i wytrzymałość mechaniczną, jak również odporność na szoki cieplne [7]. Ponadto, jako rozcieńczalnik i spoiwo konstrukcyjne wykorzystano wodne spoiwo zawierające nanocząstki  $Al_2O_3$ . Jako spoiwo dodatkowe – modyfikujące właściwości reologiczne i technologiczne mas lejnych zastosowano łatwo dostępną, tani i rozpuszczalną w wodzie glikol polietylenowy (PGE) o różnym ciężarze cząsteczkowym [8]. W odlewnictwie precyzyjnym uwagę poświęca się m. in. materiałom o wysokiej przewodności cieplnej przy jednoczesnym zachowaniu stabilności chemicznej i właściwości mechanicznych w podwyższonych temperaturach. SiC spełnia te założenia, więc może być interesującym rozwiązaniem w wytwarzaniu części silników lotniczych [9–10].

Celem pracy było odpowiednie dobranie składu mas, a następnie zbadanie wpływu rodzaju i ilości spoiwa polimerowego na stabilność, właściwości fizykochemiczne oraz reologiczne zawiesin. Wyniki przeprowadzonych pomiarów pozwolą na wyselekcjonowanie mas lejnych, które spełnią założone funkcje i będą mogły znaleźć zastosowanie na warstwy konstrukcyjne form odlewniczych.

### Materiały i metodyka

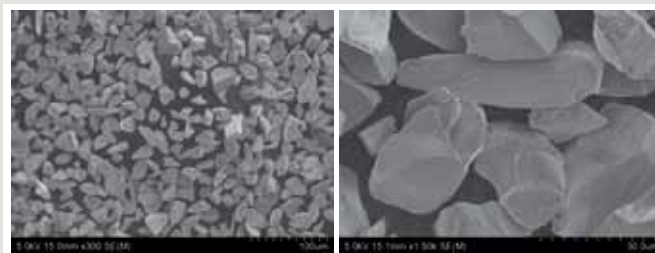
Do badań zastosowano proszek SiC F400 99C (Stanchem Polska), spoiwo konstrukcyjne zawierające koloidalny tlenek glinu ozn. (WX) (Evonik, Niemcy) o określonej średniej wielkości cząstek wynoszącej 16 nm, a także dodatki: antypieniacz i zwilzacz. Spoiwami modyfikującym były wodne roztwory glikolu polietylenowego (PGE) o ciężarach cząsteczkowych 6000, 10000 i 20000 g/mol (Carl Roth, Polska) dodane w ilościach 5%, 10% i 15% wagowych. Ilość fazy stałej w masach formierskich wynosiła 60% wagowych. Masy lejne przygotowywano w mieszadzie mechanicznym i mieszano przez 96 h w temperaturze 21°C. Do określenia czasu wypływu masy z kubka Zahna oraz do testu płyty co 24 h pobierano próbki mas formierskich.

Wielkość cząstek SiC zmierzono metodą dyfrakcji laserowej (Horiba LA-950, Japonia). Dokonano także obserwacji mikrostruktury w mikroskopie skaningowym Hitachi SU70. Zastosowano napięcie przyspieszające 5 kV oraz detektor elektronów wtórnych. Analizę składu fazowego węgla krzemu przeprowadzono z wykorzystaniem rentgenowskiego dyfraktometru proszkowego firmy Bruker typ D8 Advance z systemem automatycznego rozpoznawania komponentów układu Da Vinci. Identyfikacji faz dokonano przy użyciu komputerowej bazy danych ICDD PDF-2 Release 2010. Badanie składu chemicznego SiC F400 99C przeprowadzono z wykorzystaniem fluorescencyjnego spektrometru rentgenowskiego Bruker S4 Explorer. Spektrometr był wyposażony w lampę rentgenowską Rh z anodą miedzią, filtrami Cu, Pb oraz Al, kolimatory 0,23°, 0,46°, 1° oraz 2°, kryształy LiF200, Ge, PET oraz XS-55. Do oceny właściwości adhezyjnych badanych mas lejnych użyto mosiężnej płyty o wymiarach 75×75 mm, wadze 75,46 g i grubości 1,50 mm. Test odbywał się z wykorzystaniem procedury opracowanej na podstawie poprzednich badań doświadczalnych [11–12]. Płytę zanurzano w masie lejnnej przez 3 s, odnotowywano obciekanie gęstwy z płyty przez 180 s, a wyniki cząstkowe notowano co 15 s. Badanie umożliwiło również obliczenie grubości warstwy, jaka została osadzona na płycie. Pomiar lepkości dynamicznej przeprowadzono w reometrze Anton Paar MC 102 (Niemcy) metodą cylindrów współosiowych

w zakresach szybkości ścinania 1,3–260 i 260–1,3 1/s. Do badania czasu wypływu masy zastosowano czerpalny kubek Zahna 4 (Elcometer) o średnicy dyszy  $\varphi = 4,3$  mm. Czas wypływu zbadano za pomocą stopera cyfrowego od momentu całkowitego napełnienia kubka poprzez jego zanurzenie w masie lejnnej i określenie swobodnego wypływu gęstwy do chwili przerwania strumienia.

### Wyniki i dyskusja

Zastosowany do badań węgiel krzemu o średniej wielkości cząstek  $21,8 \pm 1,1$   $\mu\text{m}$  zmierzony w analizatorze wielkości cząstek jest proszkiem wysokiej czystości, zawierającym 99,41% SiC. Zanieczyszczeniami były  $P_2O_5$  (0,32%) i CaO (0,28%), co zostało określone w analizie XRD. Z przeprowadzonych badań XRD wynika, że jest to materiał jednofazowy i zgodny z kartami PDF 731664 oraz 291128. Było to również zgodne z wcześniejszymi pracami [7].



Rys. 1. Obrazy SEM badanego proszku SiC: a) powiększenie 300×, b) powiększenie 1500×.

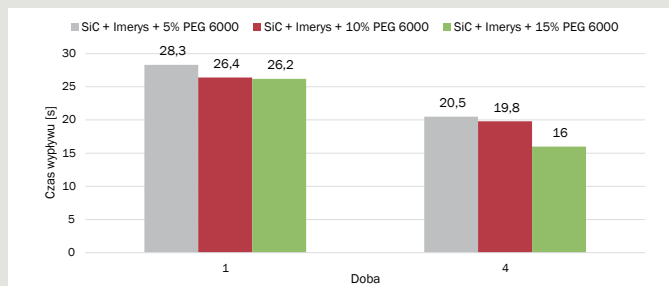
Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe zdjęcia proszku SiC, wykonane przy użyciu mikroskopu skaningowego. Charakteryzuje się on ostrymi krawędziami, nieregularnym kształtem cząstek, które są pożądane w procesach odlewniczych z uwagi na wyższy stopień zagęszczenia niż miałyby miejsce w przypadku proszków o kształcie zbliżonym do kulistego w masie formierskiej. Sprzyja to także gęstszemu upakowaniu ziaren w przyszłej formie odlewniczej [9].

Najistotniejszymi parametrami charakteryzującymi masy formierskie są lepkość oraz ilość masy lejnnej zaadsorbowanej na płycie. Na rysunkach 2–7 przedstawiono wyniki wpływu ilości i ciężaru cząsteczkowego PGE na lepkość względną i dynamiczną doświadczalnych mas formierskich z SiC. Na rysunkach 2–3 pokazano wpływ ilości PGE 6000 na lepkość mas lejnych.

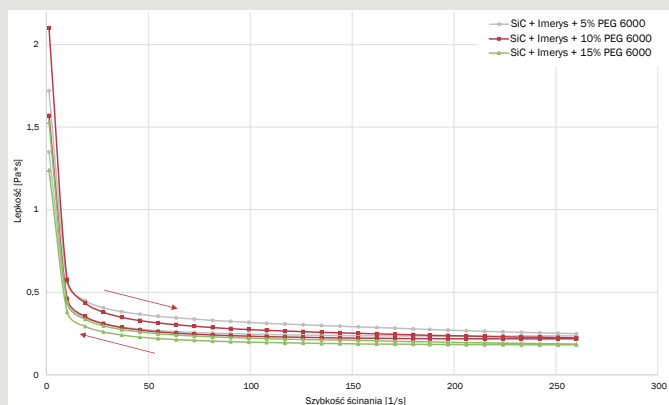
Z rysunku 2 widać, że wraz ze zwiększeniem ilości PGE 6000 nieznacznie maleje lepkość mas lejnych z SiC, co może świadczyć o upłynniającym charakterze glikolu polietylenowego o ciężarze cząsteczkowym 6000 g/mol. Zostało to potwierdzone w badaniach reologicznych wykonanych w reometrze. Z rysunku 3 widać, że najmniejszą lepkość ma zawiesina zawierająca 15% wag. PGE 6000 w całym zakresie pomiarowym. Z wykonanych badań wynika, że wraz z czasem mieszania lepkość mas lejnych zmniejsza się o ok. 30–40%. Lepkość dynamiczna mas lejnych zawiera się w zakresach: 1,720 – 0,235 Pa·s (z 5% PGE 6000); 2,100 – 0,219 Pa·s (z 10% PGE 6000) oraz 1,530 – 0,183 Pa·s (z 15% PGE 6000).

Na rysunkach 4–5 pokazano wpływ ilości PGE 10000 na lepkość mas lejnych.

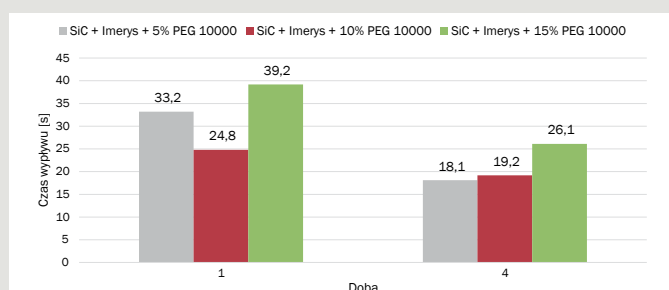
W przypadku zastosowania spoiwa o większym ciężarze cząsteczkowym o 4000 g/mol otrzymano odmienne wyniki niż dla mas z dodatkiem PGE 6000 g/mol. Z przeprowadzonych badań wynika, że wraz ze zwiększeniem udziału PGE 10000 zwiększa się lepkość względna mas lejnych z SiC (rysunek 4). Wyjątek stanowi masa zawierająca 10% wag. spoiwa, co może świadczyć o dłuższym procesie jej stabilizacji. Analogicznie jak poprzednio, lepkość względna mieszanek zmniejszyła się wraz z czasem mieszania. Czwartego dnia pomiaru wzrost lepkości względnej mas ceramicznych miał tendencję



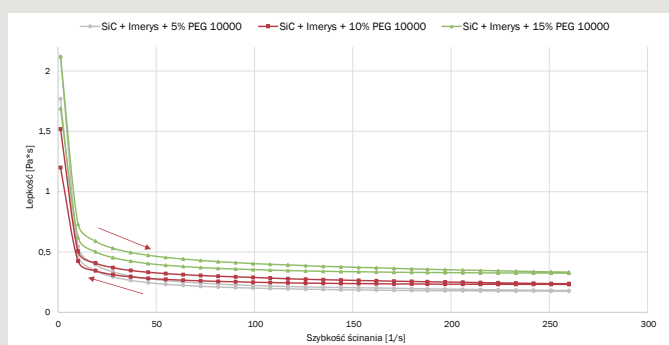
Rys. 2. Wpływ ilości PGE 6000 na czas wypływu mas w pierwszej i ostatniej dobie pomiarów.



Rys. 3. Wpływ ilości PGE 6000 na lepkość dynamiczną mas w ostatnim dniu pomiarów.



Rys. 4. Wpływ ilości PGE 10000 na czas wypływu mas w pierwszej i ostatniej dobie pomiarów.



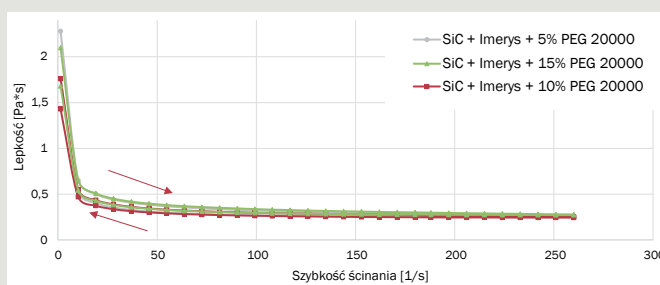
Rys. 5. Wpływ ilości PGE 10000 na lepkość dynamiczną mas w ostatnim dniu pomiarów.

rosnącą. Uzyskane wyniki korespondowały z wynikami lepkości dynamicznej mas lejnych z SiC przeprowadzonych ostatniego dnia pomiarów (rysunek 5). Najmniejszą lepkością charakteryzowała się zawieszina zawierająca 10% wag. PGE 10000, a największą 15% wag. PGE 10000. Lepkość dynamiczna mas lejnych zawiera się w zakresach: 2,120 – 0,176 Pa·s (5% PGE 10000); 1,520 – 0,231 Pa·s (10% PGE 10000) oraz 2,120 – 0,325 Pa·s (15% PGE 10000).

Na rysunkach 6–7 pokazano wpływ ilości PGE 20000 na



Rys. 6. Wpływ ilości PGE 20000 na lepkość względną mas w pierwszej i ostatniej dobie pomiarów.



Rys. 7. Wpływ ilości PGE 20000 na lepkość dynamiczną mas w ostatnim dniu pomiarów.

lepkość mas lejnych. Wyniki były analogiczne, jak dla mas z dodatkiem PGE 10000.

Otrzymane wartości lepkości względnej pierwszego dnia pomiaru były podobne jak dla mas z udziałem glikolu o dwukrotnie mniejszym ciężarze cząsteczkowym. W przypadku masy z 10% wag. dodatkiem PGE 20000 jej lepkość względna była o 5,3 s większa niż z 10% wag. dodatkiem PGE 10000. Ostatniego dnia pomiarów lepkość względna mas zmniejszyła się, z zachowaniem tendencji właściwości odnotowanych pierwszego dnia pomiarów. Potwierdziły to wyniki badań lepkości dynamicznej (rysunek 7). Najmniejszą lepkością charakteryzowała się zawieszina zawierająca 10% wag. PGE 20000, a największą 5% wag. PGE 10000. Lepkość dynamiczna mas lejnych zawiera się w zakresach: 2,28 – 0,252 Pa·s (5% PGE 20000); 1,760 – 0,244 Pa·s (10% PGE 20000) oraz 2,100 – 0,272 Pa·s (15% PGE 20000).

Należy również zauważyć, iż wszystkie otrzymane i badane masy lejne miały właściwości tiksotropowe i niepełną pętlę histerezy, co jest charakterystyczne dla mas formierskich składających się z proszków o podobnej wielkości cząstek [11–12].

„Test płyty” pozwala na oszacowanie grubości warstwy masy formierskiej, jaka pozostaje na płycie, jak również na modelu woskowym. To szybkie i proste badanie stosowane w przemyśle lotniczym, pozwala na sprawdzenie pokrycia powierzchni i krawędzi płyty oraz ocenę nieciągłości, wysychania i zapowietrzenia. Przy wykorzystaniu „testu płyty” oraz gęstości mas lejnych można obliczyć grubość powłoki jaka powstała w wyniku nałożenia masy. Wartość tę oblicza się z zależności (1):

$$H = \frac{(W_d - W_p)}{DS} \quad (1)$$

gdzie:

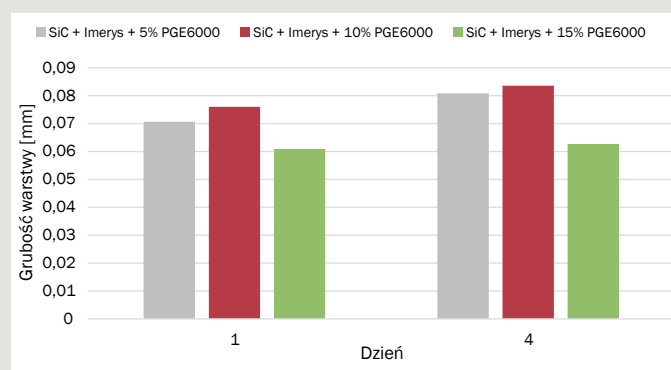
- H – grubość powłoki;
- $W_p$  – masa płyty przed zanurzeniem w gęstwie;
- $W_d$  – masa płyty po zanurzeniu w gęstwie;
- D – gęstość masy lejnej;
- S – powierzchnia całkowita płyty.

Grubość warstwy wpływa szczególnie na takie właściwości jak wytrzymałość mechaniczna, chropowatość powierzchni oraz

gazo-przepuszczalność formy odlewniczej. Wyniki adhezji mas przedstawiono na rysunkach 7–9.

Na rysunku 8 przedstawiono wyniki grubości warstw mas lejnych z SiC i PGE 6000. Widać, że ilość 5–10% wag. wpływa na zwiększenie grubości osadzonej warstwy na płycie mosiężnej. Również czas stabilizacji (i mieszania) wpływa na zwiększenie grubości masy zaadsorbowanej na powierzchni płyty. Niekorzystny jest dodatek 15% wag. PGE 6000, który wpływa na zmniejszenie grubości warstwy. Ma to związek z mniejszą lepkością masy lejnej SiC z dodatkiem 15% wag. PGE 6000. Nieco inne wyniki uzyskano dla mieszanek otrzymanych z PGE 10000 (rysunek 9). O ile korelacja pomiędzy 1 a 4 dniem pomiarów jest analogiczna, to ilość dodanego glikolu polietylenowego 10000 g/mol nie wpływa liniowo na grubość warstwy. Największe grubości mają warstwy otrzymane z udziałem 5 i 15% wag. PGE 10000. Ma to również związek z lepkością względną i dynamiczną.

Na rysunku 10 przedstawiono wyniki grubości warstw mas lejnych z SiC i PGE 20000. Podobnie jak poprzednio ilość 5 i 10% wag. PGE wpływa na zwiększenie grubości warstwy ceramicznej zaadsorbowanej na płycie. Zwiększenie czasu mieszania do 4 dni wpły-

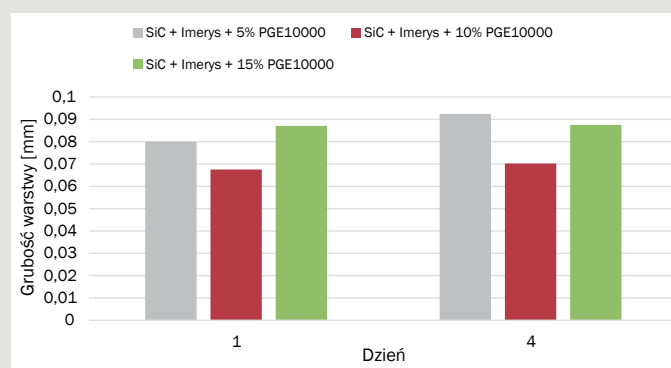


Rys. 8. Wpływ ilości PGE 6000 na grubość warstwy dla pierwszej i ostatniej doby pomiarów.

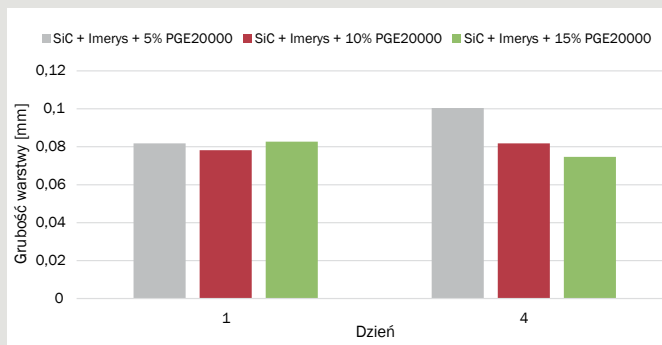
nęło na zwiększenie grubości warstwy masy lejnej, co było szczególnie widoczne dla masy z 5% wag. dodatkiem PGE 20000. W przypadku dodatku 10% wag. PGE, wzrost jest niewielki, natomiast dla masy z 15% wag. PGE 20000 zaobserwowano zmniejszenie grubości warstwy.

### Podsumowanie

Jednym z celów pracy było otrzymanie i przebadanie mas formierskich z SiC o stosunkowo dużej zawartości fazy stałej, akceptowalnej lepkości i grubości warstwy z wykorzystaniem spoiw modyfikujących o różnym ciężarze cząsteczkowym 6000, 10000 oraz 20000 g/mol i w różnej ilości (5%, 10% i 15% wag. w stosunku do proszku). Spoiwo konstrukcyjne i zarazem rozcieńczalnik stanowi dyspersja



Rys. 9. Wpływ ilości PGE 10000 na grubość warstwy dla pierwszej i ostatniej doby pomiarów.



Rys. 10. Wpływ ilości PGE 20000 na grubość warstwy dla pierwszej i ostatniej doby pomiarów.

zawierająca nano- $Al_2O_3$ . W badaniach wykorzystano wodorozpuszczalne spoiwo: glikol polietylenowy jako modyfikator właściwości reologicznych. Wykazano wpływ ciężaru cząsteczkowego na właściwości mas z SiC. Glikol polietylenowy, zwłaszcza PGE 6000, oprócz charakteru spoiwa posiada również właściwości upłynniające; a PGE 10000 również je posiada, lecz w mniejszym stopniu. Z kolei PGE 20000 pełni rolę wyłącznie spoiwa polimerowego.

Wykazano również, że dodatek 15% wag. PGE w masach (zwłaszcza 10000 i 20000 g/mol) jest niecelowy i zapewne nieekonomiczny. Uzyskane masy ceramiczne z największym przebadanym dodatkiem PGE nie charakteryzowały się przełomowymi i oczekiwanymi parametrami.

Otrzymane masy lejne spełniały podstawowe wymagania stawiane masom formierskim mogącym znaleźć potencjalne zastosowanie w przemyśle lotniczym i w odlewnictwie precyzyjnym. Natomiast SiC wciąż stanowi interesujący materiał w odlewnictwie precyzyjnym, alternatywny dla tlenku glinu, glinokrzemianów czy krzemionki [13–14].

### Podziękowanie

Badania zrealizowano w Projekcie INNOCAST: „Zaawansowane technologie odlewnicze” (INNOLOT/1/8/NCBR/2013) w Programie INNOLOT. Projekt współfinansowany ze środków NCBIr oraz Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

### LITERATURA

- R. Haratym, R. Biernacki, D. Mysza, *Ekologiczne wytwarzanie dokładnych odlewów w formach ceramicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008
- S. Jones, C. Juan, *Advances in shell moulding for investment casting*, Journ. of Mat. Process. 135, 2003
- R. Haratym, *Procesy odlewania precyzyjnego w formy odlewnicze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997
- J. L. Lewandowski, *Tworzywa na formy odlewnicze*, Wydawnictwo Akapit, Kraków 1997
- M. Szweycer, D. Nagolska, *Metalurgia i odlewnictwo*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2002
- M. Perzyk, *Odlewnictwo*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009
- P. Wiśniewski, M. Małek, R. Sitek, H. Matysiak, K. J. Kurzydłowski, *Technologiczne właściwości mas formierskich z SiC z przeznaczeniem dla ceramicznych form odlewniczych dla przemysłu lotniczego*, „Szkło i Ceramika”, 3/2014, ss. 11–15
- W. Fabianowski, *Modyfikatory reologiczne, Reologia – Teoria i zastosowanie*, EKMA, Warszawa 2010, ISBN 978-83-61905-04-2, ss. 29–48
- M. Małek, P. Wiśniewski, *Wpływ dodatku glikolu polietylenowego na właściwości mas lejnych do wytwarzania form ceramicznych na osnowie SiC do zastosowań w odlewnictwie precyzyjnym części turbin lotniczych*, „Przetwórstwo tworzyw”, 2014
- P. Wiśniewski, R. Sitek, J. Mizera, *Badania właściwości mas formierskich z korundu i glinokrzemianu przeznaczonych na ceramiczne formy odlewnicze*, „Szkło i Ceramika”, 6/2017, ss. 16–20
- M. Małek, P. Wiśniewski, J. Szymańska, J. Mizera, K. J. Kurzydłowski, *Technological Properties of Ceramic Slurries Based on Silicon Carbide with Poly(vinyl alcohol) Addition for Shell Moulds Fabrication in Precision Casting Process*, „Acta Physica Polonica A”, vol. 129, 2016, DOI: 10.12693/APhysPolA.129.528
- M. Małek, P. Wiśniewski, H. Matysiak, M. Zagórska, K. J. Kurzydłowski, *Technological properties of SiC-based ceramic slurries for manufacturing investment casting shell moulds*, „Archives of Metallurgy and Materials” 59 (3) 2014, DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0180>
- Frueh C., Poirier D. R., Maguire M. C., 1997, *The Effect of Silica-Containing Binders on the Titanium/Face Coat Reaction*, Metallurgical and Materials Transactions B 28B, DOI: 10.1007/s11663-997-0019-1
- J. Ferenc, H. Matysiak, K. J. Kurzydłowski K. J., 2010, *Organic viscosity modifiers for controlling rheology of ceramic slurries used in the investment casting*, Proceedings of the 12th International Conference on Modern Materials and Technologies (CIMTEC 2010) “Advances in Science and Technology”, vol. 70, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.70.102