

# Technologiczne właściwości mas formierskich z SiC z przeznaczeniem dla ceramicznych form odlewniczych dla przemysłu lotniczego

DR INŻ. PAWEŁ WIŚNIEWSKI<sup>1</sup>, MGR INŻ. MARCIN MAŁEK<sup>1</sup>,  
DR INŻ. RYSZARD SITEK<sup>2</sup>, DR INŻ. HUBERT MATYSIAK<sup>2</sup>,  
PROF. DR HAB. INŻ. KRZYSZTOF JAN KURZYDŁOWSKI<sup>1</sup>

1. POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ  
2. UCZELNIANE CENTRUM BADAWCZE „MATERIAŁY FUNKCJONALNE”  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

**Węgiel krzemu ze względu na swoją dużą wytrzymałość mechaniczną, twardość i odporność na szoki termiczne jest perspektywnym materiałem do wytwarzania ceramicznych form odlewniczych. Dzięki dużej dostępności, stosunkowo niskiej cenie oraz dzięki swym właściwościom fizykochemicznym jest szeroko stosowany w różnych dziedzinach, takich jak: budownictwo, inżynieria materiałowa, elektronika czy kosmonautyka.**

Węgiel krzemu charakteryzuje się także wysoką odpornością i stabilnością termiczną oraz wysoką przewodnością cieplną i elektryczną (Hirata Y. et al., 1998). W porównaniu z innymi tworzywami używanymi do produkcji przemysłowej ceramicznych form odlewniczych, SiC wykazuje kilkukrotnie większą przewodność cieplną wynoszącą 130 W/m·K w temperaturze 20°C. Dzięki dużej przewodności termicznej stosowanie SiC może stworzyć nowe możliwości sterowania makro- (wielkość ziarna) i mikrostrukturą (odległość międzydendrytyczna) odlewów, a co za tym idzie zwiększeniem ich wytrzymałości mechanicznej w podwyższonej temperaturze. Tym samym jednym z celów postawionych przed zespołem badawczym były badania nad otrzymaniem form odlewniczych z węgla krzemu. Zagadnienie to jest nowością w skali międzynarodowej. W ramach prowadzonych prac w projekcie PKAERO opracowano szereg kompozycji mas formierskich z SiC i przeprowadzono próby w skali półtechnicznej. Kolejnymi etapami były: wytworzenie i zbadanie form ceramicznych w skali półtechnicznej oraz przemysłowej, zalanie ich nadstopami niklu a następnie ocena właściwości łopatek. Wyniki okazały się na tyle interesujące, że zespół wykonawców dokonał zgłoszenia patentowego z tego zakresu (Małek M. i in., 2013).

Drugim aspektem innowacyjnym był dobór odpowiednich spoiw polimerowych. Obecnie do wytwarzania form ceramicznych przeznaczonych do odlewania precyzyjnego w przemyśle lotniczym stosowane są spoiwa konstrukcyjne na bazie zhydrolizowanego krzemianu etylu, rozpuszczalne w alkoholach, które są nieekologiczne i obniżają komfort pracy, jak również spoiwa konstrukcyjne na bazie krzemionki koloidalnej (Haratym R.,

Paweł Wiśniewski



Pracownik Zakładu Projektowania Materiałów Wydziału Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Swoją aktywność zawodową koncentruje na zagadnieniach związanych z: różnymi technikami formowania materiałów – w tym na odlewnictwie precyzyjnym; zastosowaniem dodatków polimerowych do materiałów ceramicznych; projektowaniem, otrzymywaniem i charakteryzacją ceramicznych materiałów gęstych, porowatych oraz kompozytowych do różnych zastosowań technicznych; nanotechnologią oraz eksploatacją złóż gazu łupkowego.  
[p.wisniewski@inmat.pw.edu.pl](mailto:p.wisniewski@inmat.pw.edu.pl)

## STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań technologicznych 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 65% wag. Spoiwem konstrukcyjnym był nanokompozyt polimero-ceramiczny zawierający nanocząstki  $Al_2O_3$  (IE). Jako spoiwo modyfikujące zastosowano wodny roztwór poli(alkoholu winylowego) (PVAL) 47-88 o ciężarze cząsteczkowym 47000 g/mol i stopniu hydrolizy 88%, który dodawano w ilościach 6, 10 i 15% w stosunku do proszku. Proszek SiC charakteryzowano z użyciem: wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej, skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) oraz składu fazowego w dyfraktometrze rentgenowskim. Masy formierskie charakteryzowano pod względem: lepkości dynamicznej i względnej, gęstości, pH oraz adhezji do płyty (tzw. test płyty) oraz modelu woskowego. Pomiar te przeprowadzono przez 96 h w warunkach laboratoryjnych w temperaturze 21°C. Otrzymane wyniki pokazały, że masy lejne w układzie SiC, nanokompozyt oraz (PVAL) charakteryzują się obiecującymi właściwościami i mają szansę zostać zastosowane do otrzymywania części silników lotniczych.

## SUMMARY

**The technological properties of SiC based slurries for manufacturing of ceramic shell moulds for aerospace industry**

In the present paper technological 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 65 wt. % were applied. As a structural binder polymer nanocomposite containing nano  $Al_2O_3$  was used. The poly(vinyl alcohol) (PVAL) 47-88 with molecular weight 47000 g/mol and hydrolysis degree 88%, used as a modification binder was added at different amount: 6, 10, 15 wt. %. Characterization of SiC powder was made by: grain size by laser diffraction, Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray diffraction (XRD) methods. The properties of ceramic slurries such as: relative and dynamic viscosity, density, pH, 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 slurries based on SiC, nanocomposite binder and PVAL meet the investment casting requirements of aircraft turbine parts and had promising properties.

## SŁOWA KLUCZOWE

spoiwa, odlewanie precyzyjne, poli(alkohol winylowy), SiC, masa formierska, formy odlewnicze

## KEYWORDS

binders, investment casting, poly(vinyl alcohol), SiC, slurries, shell moulds

Biernacki R., Mysza D., 2008; Ismael M.R. et al., 2006; Rodríguez J.A., Fernández-García M., 2008; Małek M. i in., 2012; Zagórska M. i in., 2012).

Spoiwa na bazie krzemionki koloidalnej odznaczają się takimi zaletami, jak: długi okres przydatności technologicznej, dobra zwilżalność powierzchni modelu woskowego, łatwość przygotowania i zastosowania spoiwa w warunkach produkcyjnych, długi okres stabilności, relatywnie niska cena, nieszkodliwość dla środowiska oraz co najważniejsze – rekomendacje producentów firm lotniczych. Jednak w porównaniu ze spoiwami alkoholowymi, spoiwa te wymagają dłuższych czasów wysychania i utwardzania kolejnych warstw form ceramicznych oraz zdarza się, że bywają niestabilne w czasie, co wymusza ich wzmożoną kontrolę (Rodríguez J.A., Fernández-García M., 2008). Jednakże spoiwa zawierające nanocząstki  $\text{SiO}_2$  nie mogą być stosowane do wytwarzania ceramicznych form odlewniczych na osnowie SiC, gdyż  $\text{SiO}_2$  jest katalizatorem rozkładu węgla krzemu w podwyższonych temperaturach i powoduje drastyczne obniżenie przewodnictwa cieplnego. Dlatego też duże nadzieje wiąże się z nowym typem spoiw konstrukcyjnych zawierających nano  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mające stanowić alternatywę dla innych szeroko stosowanych w odlewnictwie precyzyjnym. Spoiwo będące nanokompozytem polimerowo-ceramicznym zawierającym koloidalny tlenek glinu charakteryzuje się niższą temperaturą topnienia oraz wyższą przewodnością cieplną w porównaniu z  $\text{SiO}_2$ , a także lepszym zdyspersowaniem (Małek M. i in., 2012).

Zwiększenie bezpieczeństwa pracy, podniesienie czynnika ekologicznego oraz poprawę parametrów produktu można osiągnąć dzięki zastosowaniu relatywnie tanich spoiw polimerowych, w których rozpuszczalnikiem jest woda. Spoiwa te przy minimalnej dobranej ilości w procesie otrzymywania form są w stanie zapewnić odpowiednio dużą wytrzymałość mechaniczną form odlewniczych w stanie surowym, dzięki której możliwe będą transport i zalewanie form ciekłym metalem. Do spoiw wodorozpuszczalnych stosowanych w różnych procesach formowania, tj. prasowania, odlewania i otrzymywania folii (*tape-casting*) należą: poli(alkohol winylowy), glikol poli(oksyetylenowy), metyloceluloza i karboksymetyloceluloza oraz spoiwa wodorocieńczalne, tj. dyspersje poliakrylowe i poliuretanowe. Dobór odpowiedniego spoiwa oraz jego ilości jest ważnym zagadnieniem w formowaniu wyrobów ceramicznych i dotyczy głównie formowania materiałów z surowców nieplastycznych (Wu X.K. et al., 1997; Kristoffersson A., Roncari E., Galasi C., 1998; Kumar D.B.R., 2000; Wiśniewski P., 2008 cz. 1; Wiśniewski P., 2008 cz. 2; Wiśniewski P., 2008 cz. 3; Wiśniewski P., Szafran M., Rokicki G., 2008).

Poli(alkohol winylowy) (ozn. PVAL) jest syntetycznym polimerem posiadającym postać białego lub kremowego suchego pudru lub granulatu, który znajduje wiele zastosowań m.in. w przemyśle tekstylnym jako dodatek do włókien, stabilizator w klejach, a także w przemyśle kosmetycznym jako składnik kremów, mydeł i past do zębów. Zarówno w kosmologii, jak i w technologii ceramiki PVAL pełni rolę spoiwa oraz modyfikatora reologicznego. Dzięki dużej wytrzymałości, rozpuszczalności w wodzie i niskim kosztom jest jednym z najczęściej stosowanych spoiw w procesach ceramicznych. Na dużą skalę produkuje się go poprzez hydrolizę octanu winylu (Wiśniewski P., 2008 cz. 1; Bassner S.L., Klingenberg E.H., 1998; Wiśniewski P., 2007).

Produktem tego procesu jest tworzywo, które w rzeczywistości jest kopolimerem alkoholu winylowego i octanu winylu. Gdy stopień hydrolizy tego tworzywa zawarty jest w przedziale 87-99% molarowych możemy mówić o poli(alkoholu winylowym). Produkt całkowicie zhydrolizowany dzięki obecności licznych wiązań wodorowych pomiędzy łańcuchami staje się rozpuszczalny w gorącej wodzie, co z punktu widzenia technologicznego jest niekorzystne. Zazwyczaj

stosowane są odmiany tego polimeru o stopniu hydrolizy 80–88%, który posiada od 12 do 20% niezhydrolizowanych grup octanowych. Wymuszone w ten sposób rozsuniecie się łańcuchów polimerowych zmniejsza w nich udział międzycząsteczkowych wiązań wodorowych, co wpływa na łatwe rozpuszczanie się PVAL nawet w zimnej wodzie (Fabianowski W., 2010).

Dotychczas poza doniesieniami autorów artykułu nie są znane prace dotyczące otrzymywania form odlewniczych dla przemysłu lotniczego z zastosowaniem poli(alkoholu winylowego), ani z proszku SiC, ani zastosowania spoiwa konstrukcyjnego zawierającego koloidalny  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dlatego prace te należą do pionierskich w skali światowej (Małek M. i in. [w druku]; Małek M. i in., 2013). Kolejne wyniki prac dotyczące mas lejnych z SiC,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  oraz form odlewniczych dedykowane dla przemysłu lotniczego, będących autorskimi rozwiązaniami będą ukazywały się wkrótce na łamach czasopism naukowych, w tym również w „Szkle i Ceramice”.

#### Metodyka badawcza i materiały

W pracy zastosowano proszek SiC F400 99C (Stanchem Polska), spoiwo konstrukcyjne na bazie nanotlenku glinu ozn. IE (Evonik, Niemcy) oraz dodatki antypienne i zwilżające. Spoiwem modyfikującym był roztwór wodny poli(alkoholu winylowego) 47-88 (Mowiol, Niemcy) o ciężarze cząsteczkowym 47000 g/mol i stopniu hydrolizy 88% dodany w ilościach 6, 10, 15% wagowych. Ilość fazy stałej wynosiła 65% wagowych. Masy lejne przygotowywano w mieszadło mechanicznym i mieszano przez 96 h w temperaturze 21°C. Do badań codziennie o stałej godzinie pobierano próbki mas formierskich.

Wielkość cząstek SiC zmierzono metodą dyfrakcji laserowej (Horiba LA-950, Japonia). Dokonano także obserwacji mikrostruktury w mikroskopach skaningowych Hitachi 3500 oraz 5500. Zastosowano napięcie przyspieszające 30 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. W przeprowadzonych pomiarach zakres zmiany kąta  $2\theta$  wynosił 20-100°. Źródłem promieniowania rentgenowskiego była lampa miedziana o długości fali  $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$  z filtrem niklowym w celu usunięcia widma linii  $K_{\beta}$ . Czas naboru widma w punkcie pomiarowym wynosił 3 s, krok  $2\theta$  0,02. Za źródłem oraz przed detektorem pozycyjnie czułym PSD zastosowano układ szczelin Sollera 2,5°. W wyniku analizy otrzymano dyfraktogram przedstawiający zależność intensywności natężenia promieniowania X w funkcji kąta  $2\theta$ . 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 miedzianą, filtrami Cu, Pb oraz Al, kolimatory 0,23°, 0,46°, 1° oraz 2°, kryształy LiF200, Ge, PET oraz XS-55.

Odczyn substancji poddanych analizie zbadano przy użyciu pH-metru wyposażonego w elektrodę do zawiesin. Gęstość oznaczono za pomocą aerometru o zakresie pomiarowym do 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Do identyfikacji właściwości adhezyjnych badanych mas lejnych użyto mosiężnej płyty o wymiarach 75×75 mm i wadze 75,46 g. Test odbywał się z wykorzystaniem procedury opracowanej na podstawie poprzednich badań doświadczalnych. Odnutowywano obciekanie gęstwy płyty przez 180 s, a wyniki cząstkowe notowano co 15 s. Pomiar lepkości dynamicznej przeprowadzono w viskozymetrze rotacyjnym Brookfield DV-II+ (USA) metodą cylindrów współosiowych w zakresach 10-200 i 200-10 obrotów na minutę. Do badania lepkości względnej zastosowano zanurzeniowy kubek czerpalny Zahna o średnicy dyszy  $\varphi = 4 \text{ mm}$ .

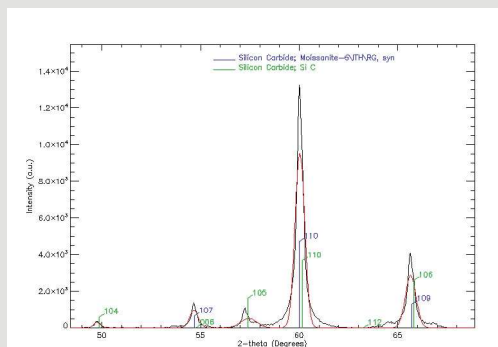
## Wyniki i dyskusja

Na rysunku 1. przedstawiono zindeksowany dyfraktogram proszku SiC F400 99C. Otrzymane wyniki wykazały, że badany materiał jest jednofazowy (zgodność z kartami katalogowymi PDF: 731664 oraz 291128). Zastosowany proszek charakteryzował się dużą czystością, czego potwierdzeniem jest wynik składu chemicznego, przedstawiony w tabeli 1. Sumaryczna ilość zanieczyszczeń w węgliku krzemu nie przekracza 0,6% wag.

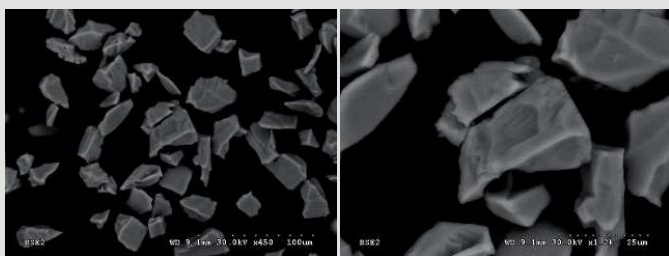
Tabela 1. Skład chemiczny proszku SiC F400 99C.

Pierwiastek	Zawartość [%]
Si	99,41
P	0,32
Ca	0,26
Ni	< 15 ppm
Fe	10 ppm

Na rysunku 2. przedstawiono przykładowe zdjęcia mikrostruktury zastosowanego węglika krzemu. Częstki proszku posiadają nieregularny kształt i ostre krawędzie. Dużo korzystniejsze byłoby zastosowanie fazy stałej o lepszej kulistości, co jednak znacznie wpłynęłoby na wzrost kosztów form odlewniczych. Dlatego w niniejszej pracy oraz często w praktyce przemysłowej stosuje się proszki rzeczywiste o nieregularnym kształcie. Ponadto w odniesieniu do zdolności otrzymania form ceramicznych cząstki ostrokrawędziste i nieregularne wpłyną na większe upakowanie w masie formierskiej, co będzie sprzyjać lepszemu pokryciu powierzchni modelu woskowego. Jednakże kluczowym zagadnieniem jest odpowiedni dobór i dodatek spoiw poli-  
merowych do mas lejnych.



Rys. 1. Zindeksowany dyfraktogram proszku SiC F400 99C

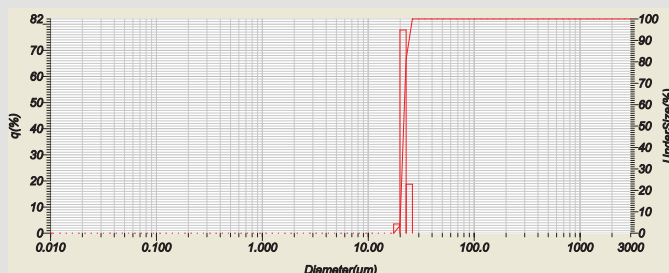


Rys. 2. Mikrostruktura cząstek proszku SiC F-400 99C

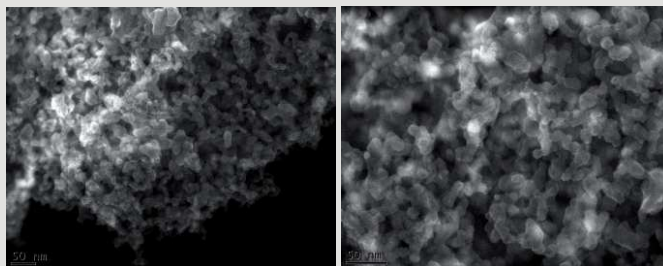
Na rysunku 3. przedstawiono wynik wielkości cząstek proszku SiC F-400 99C. Rozkład jest monomodalny, a średnia wielkość cząstek wynosi  $21,8 \pm 1,1 \mu\text{m}$ .

Na rysunku 4. przedstawiono przykładową morfologię (SEM) wysuszonego kompozytu IE na siatce grafitowej w mikroskopie Hitachi 5500.

Ze zdjęć widać nanocząstki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  w spoiwie IE. Kształt nanocząstek jest zbliżony do kulistego, natomiast polimer zawarty w układzie całkowicie pokrył powierzchnię cząstek tlenku glinu i spowodował ich aglomerację. Na podstawie pomiarów stereologicznych oszacowano, że średnia wielkość cząstek tlenku glinu wynosi 16 nm.

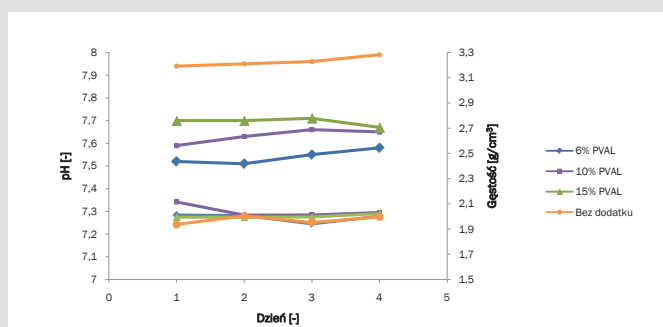


Rys. 3. Rozkład wielkości cząstek proszku SiC F-400 99C



Rys. 4. Morfologia (SEM) wysuszonego kompozytu IE osadzonego na siatce grafitowej

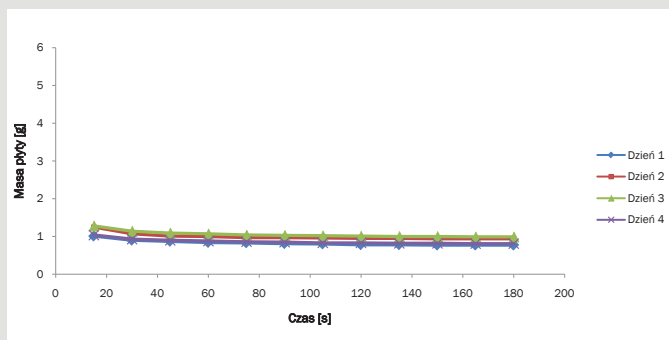
Podstawowymi właściwościami technologicznymi mieszanek formierskich są odczyn oraz gęstość. Na rysunku 5. przedstawiono wyniki zmian pH oraz gęstości mas formierskich w czasie trwania cyklu pomiarowego. Referencją były wyniki dla masy formierskiej, którą sporządzono bez dodatku PVAL. Właściwości zawiesiny formierskiej bez dodatku PVAL mimo stabilności lepkości okazały się nieakceptowalne. Dlatego też konieczne było wprowadzenie do układu spoiwa modyfikującego.



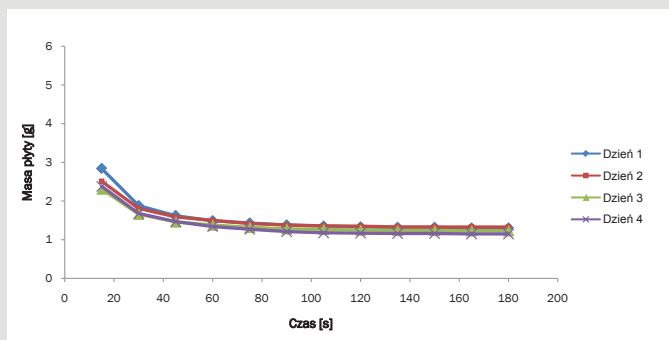
Rys. 5. Wyniki pomiaru pH oraz gęstości dla badanych mas formierskich

Jak widać na rysunku 5., pH w całym cyklu pomiarowym zmieniło się nieznacznie. Najwyższe wartości zanotowano dla mieszaniny formierskiej bez dodatku PVAL. Dla pozostałych mieszanin zaobserwowano bardzo podobne wyniki pomiarów znajdujące się w granicach 7,5-7,7. Gęstość badanych mieszanin jest zbliżona i wynosi  $\sim 2 \text{ g/cm}^3$ .

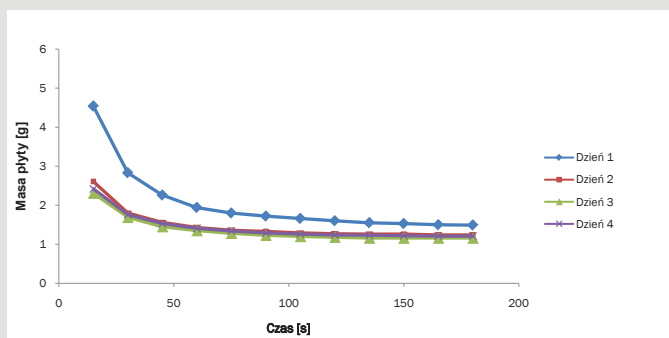
Istotnymi parametrami ceramicznych mas odlewniczych ocenianymi w branży lotniczej są: obciekanie oraz adhezja masy lejnej do podłoża, tj. płyty mosiężnej. Na rysunkach 6-9 zaprezentowano wyniki obciekania mas lejnych bez oraz z dodatkiem 6, 10 i 15% wag. PVAL. Testy rozpoczęto po 24 h mieszania.



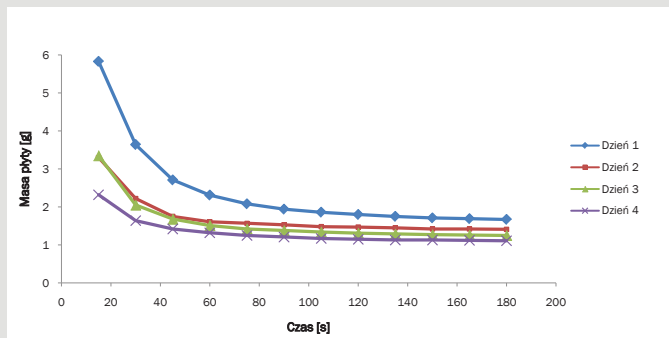
Rys. 6. Wyniki testu obciekania masy lelej SiC bez dodatku PVAL 47-88



Rys. 7. Wyniki testu obciekania masy lelej SiC z dodatkiem 6% wag. PVAL 47-88



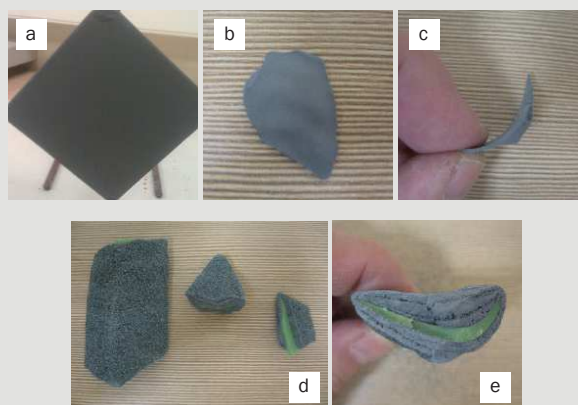
Rys. 8. Wyniki testu obciekania masy lelej SiC z dodatkiem 10% wag. PVAL 47-88



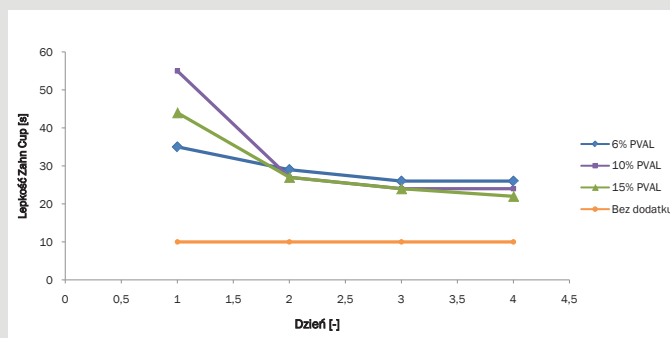
Rys. 9. Wyniki testu obciekania masy lelej SiC z dodatkiem 15% wag. PVAL 47-88

Na rysunkach 6-9 można zaobserwować, iż dodatek spoiwa wypełniającego w postaci poli(alkoholu winylowego) spowodował zwiększenie ilości masy ceramicznej na powierzchni płyty do ~2g. Jest to wynik wzrostu lepkości gęstwy. *Plateau* dla masy formierskiej bez dodatku PVAL ustaliło się w okolicach 60 s, natomiast dla mas z dodatkiem na poziomie 80 s.

Rysunek 10. przedstawia przykładową ocenę adhezji masy formierskiej do płyty mosiężnej oraz modelu woskowego fragmentu łopatki silnika lotniczego i kolejnych warstw wraz z posypkami. Model



Rys. 10. Ocena adhezji masy formierskiej z 6% wag. udziałem PVAL do: (a) płyty mosiężnej; (b-c) modelu woskowego fragmentu łopatki silnika lotniczego (tzw. warstwa przymodelowa bez posypki); (d-e) trzech warstw wraz z posypkami.



Rys. 11. Zmiana lepkości względnej mas formierskich z SiC bez oraz z dodatkiem 6, 10 i 15% wag. PVAL

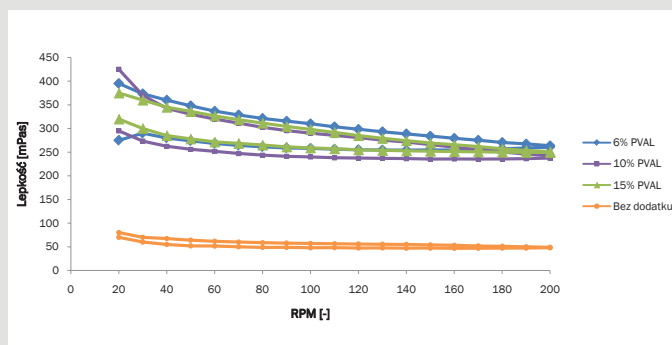
woskowy codziennie zanurzano w masie lelej, a następnie posypywano proszkiem SiC F80 i zostawiano do wyschnięcia. Przez kolejne dni operację powtarzano.

Oszacowanie adhezji masy lelej do płyty mosiężnej obejmuje: ocenę równomierności pokrycia powierzchni i krawędzi, grubość otrzymanej warstwy, a także jej trwałość, dobre przyleganie i odporność. Uzyskane masy lejne z SiC zapewniały dobre pokrycie płyty i jej naroży bez zacieków i zapowietrzeń (rys. 10a), w związku z tym uznano że mogą być odpowiednie także dla woskowych modeli formierskich. Na fragmentach elementów woskowych z łopatek modeli naniesiono początkowo jedną (rys. 10b-c), a następnie trzy warstwy wraz z posypką z SiC (rys. 10d-e). Otrzymano warstwowy model o odpowiednich cechach.

Ostatnimi ocenianymi parametrami były lepkość względna oraz lepkość dynamiczna. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunkach 11-12.

Lepkość względna mieszanin formierskich z dodatkiem PVAL maleje każdego dnia pomiaru i ustala się na poziomie ~30 s. Jest to spowodowane dłuższym czasem stabilizacji mas lejnych wynikających z zachodzących reakcji chemicznych między spoiwami a SiC. Dla gęstwy bez dodatku PVAL lepkość każdego dnia pomiaru wynosi 10 s.

Z porównania wyników lepkości dynamicznej zamieszczonych na rysunku 12. widać, iż dodatek PVAL znacząco zwiększył lepkość



Rys. 12. Zmiana lepkości względnej mas formierskich z SiC bez oraz z dodatkiem 6, 10 i 15% wag. PVAL

badanych mieszanin. Dla masy leejnej bez dodatku lepkość waha się w granicach 75 mPas. Dodatek PVAL wpłynął na trzy-, czterokrotne zwiększenie lepkości (275-425 mPas), przy czym nie stwierdzono znaczącego wpływu ilości PVAL na lepkość mas leejnych. W związku z tym ze względu na uzyskane wyniki oraz z uwzględnieniem aspektu ekonomicznego najkorzystniejszy jest 6% wag. dodatek PVAL do mas formierskich. Wszystkie zawiesiny ceramiczne posiadały właściwości tiksotropowe, a dodatek poli(alkoholu winylowego) wpłynął na charakterystykę mas formierskich o szerszej i niepełnej pętli histerezy w porównaniu z mieszką niezawierającą PVAL.

#### Podsumowanie

Jednym z celów pracy i wymogów przemysłowych było uzyskanie relatywnie taniach mas formierskich z SiC o możliwie dużej koncentracji proszku ceramicznego i jednocześnie o małej lepkości, tak by można je było zastosować jako warstwy konstrukcyjne form odlewniczych o podwyższonej przewodności cieplnej.

W artykule przedstawiono wyniki badań ceramicznych mas leejnych w układzie SiC – nano  $Al_2O_3$  z potencjalnym przeznaczeniem do wytwarzania przewodzących form ceramicznych do odlewania części silników lotniczych z nadstopów niklu.  $Al_2O_3$  w spoiwie pełnił rolę nanowypełniacza i był wprowadzony do mieszką w postaci dyspersji polimerowej (nanokompozytu IE), pełniącej rolę spoiwa konstrukcyjnego, rozcieńczalnika mającego nadać odpowiednią wytrzymałość mechaniczną gotowej formie w stanie surowym i tym samym po obróbce termicznej oraz w procesie zalewania. Drugim spoiwem był poli(alkohol winylowy) 47-88, który miał za zadanie:

- pełnić rolę modyfikatora reologicznego w masach leejnych,
- zapewnić odpowiednią wytrzymałość mechaniczną kolejnym warstwom,
- umożliwić uzyskiwanie kolejnych warstw formy,
- zapewnić adhezję posypki SiC do nałożonych warstw konstrukcyjnych.

Wyniki badań udowodniły, iż dodatek PVAL spowodował znaczącą poprawę podstawowych parametrów technologicznych badanych mieszanin formierskich. Zwiększył lepkość zawiesin oraz spowodował ich stabilizację i wydłużył okres przydatności w stosunku do masy bez dodatku PVAL. Każda z badanych mas formierskich spełniała podstawowe parametry technologiczne i mieści się w zakresie 25-40 s kubka pomiarowego Zahn 4#. Nie zauważono dużego wpływu ilości dodatku na właściwości otrzymanych gęstw ceramicznych.

Mieszaniny charakteryzowały się także bardzo dobrym pokryciem płyty mosiężnej oraz modeli woskowych przed procesem posypywania proszkiem SiC na całej powierzchni próbki i po posypaniu, zarówno na płaskich obszarach, krzywiznach, jak i na krawędziach.

Cząstki posypki bardzo dobrze przylegały do warstwy gęstwy i nie odrywały się po wysuszeniu.

Przedstawione w artykule wyniki badań są jednymi z pierwszych prac w skali światowej w dziedzinie odlewnictwa precyzyjnego dotyczącego mas ceramicznych do otrzymania form odlewniczych służących do produkcji części silników lotniczych z nadstopów niklu.

Praca jest podstawą do dalszych badań nad procesem przygotowania i upłynniania ceramicznych mas leejnych dedykowanych przemysłowi lotniczemu.

Badania realizowane w ramach Projektu PKAERO „Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym”, Nr POIG.01.01.02-00-015/08-00 w Programie Operacyjnym Innowacyjna Gospodarka (PO IG). Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

#### LITERATURA

- [1] Hirata Y. et al. (1998). *Reaction between SiC surface and aqueous solutions containing Al. Ions*, Physicochemical and Engineering Aspects 133(1998), s. 183-189
- [2] Małek M. i in. (2013). *Lejna mieszanina formierska do produkcji ceramicznych form odlewniczych*, P. 406518 (2013)
- [3] Haratym R., Biernacki R., Mysza D. (2008). *Ekologiczne wytwarzanie dokładnych odlewów w formach ceramicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej
- [4] Ismael M.R. et al. (2006). *Colloidal silica as a nostructured binder for refractory castables*, Refractories Applications and News, 2006, vol. 11, nr 4, s. 16-20
- [5] Rodríguez J.A., Fernández-García M. (2008). *Synthesis, Properties, and Applications of Oxide Nanomaterials*, JohnWiley & Sons, Inc. New Jersey
- [6] Małek M. i in. (2012). *Analiza porównawcza spoiw formierskich na bazie krzemionki koloidalnej stosowanych do budowy form ceramicznych do odlewania precyzyjnego części turbin lotniczych*, XL Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków
- [7] Zagórska M. i in. (2012). *Charakterystyka właściwości form ceramicznych wytworzonych na bazie wodnych spoiw Keycol i Matrixsol*, XL Szkoła Inżynierii Materiałowej, Kraków
- [8] Wu X.K. et al. (1997). *Acrylic binders for die pressing ceramics*, The American Ceramic Society Bulletin, 76, [1], (1997), p. 49-52
- [9] Kristoffersson A., Roncari E., Galasi C. (1998). *Comparison of different binders for water-based tape casting of alumina*, [w:] „Journal of the European Ceramic Society”, 18(1998), p. 2123-2131
- [10] Kumar D.B.R (2000). *Acrylic co-polymer emulsion binders for green machining of ceramics*, [w:] „European Polymeric Journal” 38(2000), p. 1503-1510
- [11] Wiśniewski P. (2008). *Dodatki organiczne we współczesnej ceramice – cz. 1*, [w:] „Szkło i Ceramika” 1/2008, s. 9-14
- [12] Wiśniewski P. (2008). *Dodatki organiczne we współczesnej ceramice – cz. 2*, [w:] „Szkło i Ceramika” 2/2008, s. 43-47
- [13] Wiśniewski P. (2008). *Dodatki organiczne we współczesnej ceramice – cz. 3 – Spoiwa a proszek ceramiczny*, [w:] „Szkło i Ceramika” 3/2008, s. 12-16
- [14] Wiśniewski P., Szafran M., Rokicki G. (2008). *Wodorozcieńczalne dyspersje polimerowe w procesie jednostronnego prasowania  $Al_2O_3$* , [w:] „Materiały Ceramiczne” 3/2008, s. 106-112.
- [15] Bassner S.L., Klingenberg E.H. (1998). *Using poly(vinyl alcohol) as a binder*, [w:] The American Ceramic Society Bulletin, June (1998), p. 71-75
- [16] Wiśniewski P. (2007). *Zastosowanie poli(alkoholu winylowego) w formowaniu tworzyw ceramicznych*, [w:] „Szkło i Ceramika” 6/2007, s. 26-31
- [17] Fabianowski W. (2010). *Modyfikatory reologiczne*, [w:] *Reologia – Teoria i zastosowanie*, EKMA, Warszawa, ISBN 978-83-61905-04-2, s. 29-48
- [18] Małek M. i in. (w druku). *Wpływ dodatku glikolu poli(etylenowego) na właściwości mas leejnych do wytwarzania form ceramicznych na osnowie SiC do zastosowań w odlewnictwie precyzyjnym części turbin lotniczych*, [w:] „Przetwórstwo Tworzyw”
- [19] Małek M. i in. (2013). *Zastosowanie tlenku itru do budowy warstwy przyrodowej ceramicznych form odlewniczych stosowanych w odlewnictwie precyzyjnym*, [w:] „Szkło i Ceramika” 6/2013, s. 8-11