

# Badania właściwości mas formierskich z korundu i glinokrzemianu przeznaczonych na ceramiczne formy odlewnicze

DR INŻ. PAWEŁ WIŚNIEWSKI, 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 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.

e-mail: [p.wisniewski@inmat.pw.edu.pl](mailto:p.wisniewski@inmat.pw.edu.pl)

## Wprowadzenie

Do wytwarzania odlewów precyzyjnych z nadstopów niklu i kobaltu w przemyśle obronnym i lotniczym stosowane są ceramiczne formy odlewnicze, które wykonywane są z mas lejnych, tzw. gęstw. Podstawowym składnikiem tego typu zawiesin formierskich jest proszek ceramiczny, tj. kwarc topiony, tlenek cyrkonu, węgiel krzemu (SiC), korund (tlenek glinu) i glinokrzemiany [1–4]. Biorąc pod uwagę czynniki technologiczne, ekologiczne i ekonomiczne, jak również rosnące wymagania stawiane odlewom, coraz częściej stosuje się dwa ostatnie z wymienionych materiałów ziarnistych. Są one w stanie zapewnić dobrą jakość odlewów przy zachowaniu akceptowalnej przez przemysł lotniczy ceny materiałów i kosztów wytworzenia form odlewniczych [5–8].

Drugim składnikiem mieszanek formierskich są spoiwa polimerowe, które dobiera się w zależności od rodzaju zastosowanego proszku. Z punktu widzenia materiałowego, spoiwa te są w rzeczywistości nanokompozytami polimerowo-ceramicznymi (rozproszonymi nanocząstkami w roztworze polimeru). Do najpowszechniej stosowanych spoiw należą: zhydrolizowany krzemian etylu (ZKE) na bazie

## STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań właściwości mieszanek formierskich z korundu oraz glinokrzemianu (Remasil 60), które przeznaczono na pierwszą warstwę oraz warstwy konstrukcyjne form odlewniczych służących do odlewania precyzyjnego. Określono wpływ zawartości fazy stałej na parametry mas formierskich oraz dokonano wyboru systemów formierskich o odpowiednich parametrach. Najkorzystniejsze wyniki otrzymano dla mieszanek formierskich: przeznaczonych na warstwę przymodelową, których stężenie fazy stałej wynosiło 72,5% wag. oraz mieszanki na warstwy konstrukcyjne, gdzie udział proszku wyniósł 70% wag. Spoiwem konstrukcyjnym był nanokompozyt polimerowo-ceramiczny zawierający nanocząstki SiO<sub>2</sub> (LUDOX AM30). Proszki charakteryzowano z użyciem: analizatora wielkości cząstek metodą dyfrakcji laserowej oraz skaningowych mikroskopów elektronowych (SEM), a nanokompozyt z wykorzystaniem mikroskopu STEM. Masy formierskie charakteryzowano pod względem: lepkości dynamicznej i względnej, gęstości, pH oraz adhezji do płyty (tzw. „test płyty”). Pomiaru te przeprowadzono przez siedem dni w warunkach laboratoryjnych w temperaturze 20°C. Otrzymane wyniki pokazały, że masy lejne z korundu i glinokrzemianu oraz nanokompozytu zawierającego krzemionkę koloidalną charakteryzują się dobrymi właściwościami i mają szansę zostać zastosowane w odlewnictwie precyzyjnym do otrzymywania form.

## SUMMARY

### Studies of the properties of alumina and aluminosilicate slurries for ceramic shell moulds

The paper presents results properties of alumina and aluminosilicate slurries dedicated to the first layer and construction layers of shell molds, respectively. The influence of the solid phase content on the parameters of the slurries was determined. Particle size distribution was determined with use of the advanced laser particle size analyzer Horiba LA-950 (LALLS technique). To characterize morphology of the powders and binder scanning electron microscopy (SEM and STEM) observations were performed. The slurries were prepared in a mechanical mixer. The experiment was based on a daily plate weight tests and pH, Zahn cup (4 mm diameter) viscosity and dynamic viscosity by rheometer with a shear rate range of 1–100–1 1/s measurements that are fundamental for investment casting industry. Adhesion of the examined mass was determined by the plate immersion (dimensions: 75×75 mm) in a slurry and estimation its weight of 75.46 g. The slurry dipping was controlled during 180 seconds with results notation every 15 seconds. The obtained results proved opportunity of their application for the investment casting and foundry, being prospective issue for future fabrication of shell moulds.

## SŁOWA KLUCZOWE

ceramiczne formy odlewnicze, masy formierskie, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, glinokrzemian, nano SiO<sub>2</sub>, odlewanie precyzyjne

## KEYWORDS

ceramic shell molds, slurries, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, aluminosilicate, nano SiO<sub>2</sub>, precision casting

alkoholu (od zastosowania którego się odchodzi), nanokompozyty polimerowo-ceramiczne mające postać dyspersji wodnej zawierające krzemionkę koloidalną, jak również dyspersje zawierające nanometryczny proszek tlenku glinu [9–10]. Celem dodawania tego typu spoiw jest: związanie cząstek proszku ceramicznego w surowej formie, zapewnienie odpowiednich parametrów technologicznych i reologicznych masom formierskim, zapewnienie gotowej formie wysokiej wytrzymałości, żaroodporności oraz otrzymywanie detali spełniających normy produkcyjne. Typowa, ceramiczna forma odlewnicza składa się z kilku warstw ceramicznych (przeważnie 6–9). Pierwsza warstwa, tzw. warstwa przymodelowa, po wytopieniu modelu woskowego znajduje się w bezpośrednim kontakcie z ciekłym metalem i z tego względu musi się ona charakteryzować obojętnością chemiczną wobec odlewianego stopu. Kolejne warstwy to tzw. warstwy konstrukcyjne, których zadaniem jest zapewnienie wysokiej szczelności, uniemożliwiającej wydostawanie się ciekłego metalu przez pory bądź pęknięcia formy, jak również wysokiej wytrzymałości mechanicznej formy odlewniczej, aby nie uległa zniszczeniu w trakcie procesu technologicznego [1, 3, 11].

Trzecią grupę dodatków do mas lejnych stanowią tzw. materiały pomocnicze, używane w niedużych ilościach, nieprzekraczających dziesiątych części procenta w stosunku do zastosowanego proszku ceramicznego. Do grupy tej należą środki przeciwpienne i zwilżające [11–12]. Proces otrzymywania form odlewniczych jest znany i wielokrotnie opisany [1–4, 11, 13].

Celem pracy były badania nad otrzymaniem mas formierskich opartych na proszkach korundu oraz glinokrzemianu (Remasil 60), o możliwie dużej zawartości proszku ceramicznego i jednocześnie akceptowalnej lepkości, tak by można je było zastosować jako warstwy przymodelowe (masa korundowa) oraz konstrukcyjne (masa glinokrzemianowa) form odlewniczych.

## Materiały

### a. Proszki ceramiczne

Na pierwszą warstwę (warstwę przymodelową) zastosowano trzy rodzaje proszków:  $Al_2O_3$  (korund) o wielkości cząstek 28,0  $\mu m$  (200 mesh) i 7,3  $\mu m$  (325 mesh) (Remet, UK) oraz glinian kobaltu (II) (Sigma Aldrich), o średniej wielkości cząstek 8,4  $\mu m$ . Na warstwę konstrukcyjną zastosowano proszek glinokrzemianowy (mullitowy) Remasil 60 (Remet, UK) o średniej wielkości cząstek 3,0  $\mu m$ . Wybór proszków na poszczególne warstwy formy odlewniczej został podyktowany reżimem technologicznym i wymaganiami partnera przemysłowego, z którym współpracują autorzy artykułu.

Wielkość cząstek proszków określono w laserowym analizatorze uziarnienia Horiba LA-950 z wykorzystaniem techniki LALLS (Low Angle Laser Light Scattering – niskokątowe rozpraszanie światła laserowego), pozwalającej na uzyskanie pełnej charakterystyki geometrycznej i morfologicznej proszków. Morfologię proszków oceniono w mikroskopach skaningowych Hitachi TM1000 i 3500N.

### b. Spoiwa polimerowe

Spoiwem polimerowym było wodne spoiwo polimerowo-ceramiczne LUDOX AM30 (Remet, UK), zawierające 30% nanometrycznego  $SiO_2$ . Obserwacje spoiwa przeprowadzono w mikroskopie STEM Hitachi 5500. Próbkę rozcieńczano w alkoholu izopropylowym, a następnie zawieszinę nanoszono na błonę węglową. Odparowujący alkohol pozostawił na jej powierzchni cząstki krzemionki koloidalnej znajdującej się w nanokompozycie. Tak przygotowany preparat umieszczono w mikroskopie.

### Metodyka badawcza

W celu otrzymania mas lejnych o akceptowalnych parametrach (tj. zakresie lepkości względnej) przygotowano i badano mieszanki

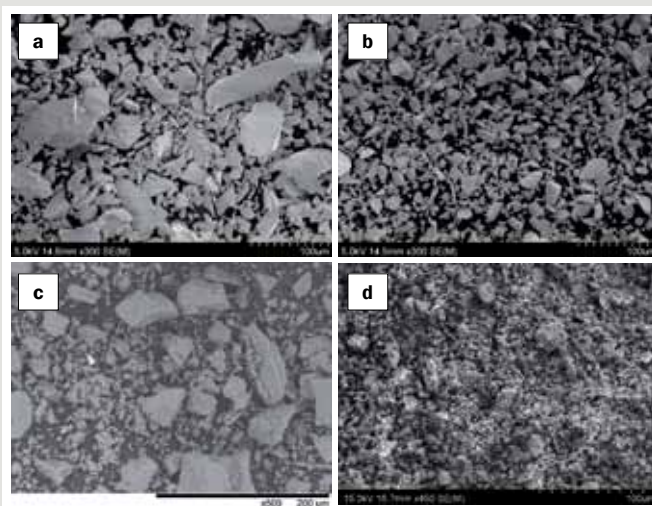
formierskie o różnym udziale fazy stałej, w zakresie 65–75% wag. Celem prac było określenie wpływu ilości proszku na właściwości technologiczne i reologiczne mas lejnych oraz dobór optymalnej ilości fazy stałej w masach formierskich. Badania odbywały się w oparciu o procedury opracowane na podstawie własnych doświadczeń z uwzględnieniem procedur stosowanych w odlewniach precyzyjnych, w warunkach przemysłowych. Masy lejne mieszano w mieszadło mechanicznym CAT R50D (Niemcy) przez ponad 24 h, z szybkością 150 obr./min w temperaturze pokojowej. Każdego dnia sprawdzano ich parametry, tj.: gęstość, pH, czas obciekania i adhezję (tzw. „test płyty”), lepkość względną (czas wypływu z kubka Zahna) i lepkość dynamiczną. Odczyn spoiw i mas formierskich zbadano przy użyciu pH-metru Sension 1 (Hach), wyposażonego w elektrodę do zawiesin. Do oceny adhezji badanych mas lejnych użyto płyty mosiężnej o wymiarach 75×75 mm i wadze 75,46 g. Odnotowywano obciekanie gęstwy z płyty przez 180 s, a wyniki cząstkowe notowano co 15 s. Gęstość mas formierskich określono przy pomocy areometru. Do badania lepkości względnej zastosowano czerpalny kubek Zahna o średnicy dyszy wylotowej wynoszącej 4 mm. Lepkość dynamiczną mas lejnych określono metodą cylindrów współosiowych w zakresie szybkości ścinania 1–100 1/s, ostatniego dnia pomiarowego wykorzystując reometr Anton Paar MC102. Pomiary wykonano przy wzrastających, a następnie malejących obrotach wrzeciona pomiarowego.

### Wyniki i dyskusja

Na rysunku 1. przedstawiono przykładowe zdjęcia proszków: tlenku glinu, glinokrzemianu oraz glinianu kobaltu (II) wykonane przy użyciu mikroskopu SEM. Badane proszki są proszkami używanymi w przemyśle odlewniczym. Charakteryzują się one ostrymi krawędziami, nieregularnymi cząstkami, które są pożądane w procesach odlewniczych z uwagi na wysoki stopień zagęszczenia w masie formierskiej, co sprzyja równomiernemu pokryciu płyty i modelu woskowego.

Nanocząstki  $SiO_2$  w spoiwie LUDOX AM30 mają kształt zbliżony do kulistego i są zaglomerowane (rysunek 2). Średnia wielkość cząstek nanokrzymionki wynosi 16 nm. W pierwszej kolejności mieszanki formierskie muszą odznaczać się odpowiednią lepkością względną mierzoną wypływowym kubkiem Zahna 4 mm.

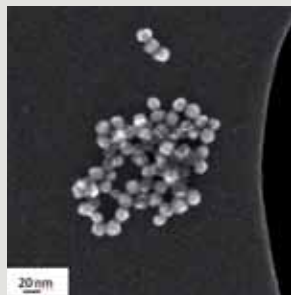
Jest ona pierwszym wyznacznikiem możliwości zastosowania mieszanki w odlewniach. Na ogół lepkość mieszanek na pierwszą warstwę powinna mieścić się w zakresie 20–35 s, a na warstwy konstrukcyjne wynosić kilkanaście sekund.



Rys. 1. Obrazy SEM badanych proszków: A –  $Al_2O_3$  200 mesh; B –  $Al_2O_3$  325 mesh; C – glinokrzemian (Remasil 60); D – glinian kobaltu (II).

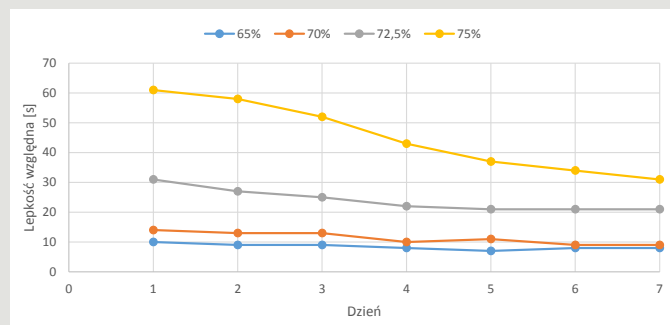
W związku z tym przeprowadzono prace, które dotyczyły przygotowania mieszanek formierskich o odpowiednim i możliwie dużym udziale fazy stałej, pomiarze ich lepkości, wyborze najkorzystniejszych systemów dla odlewnictwa precyzyjnego, a następnie pomiarze pozostałych parametrów dla wybranych mas lejnych.

Rysunek 2 przedstawia zdjęcie spoiwa LUDOX AM30 wykonane w mikroskopie elektronowym (STEM).



Rys. 2. Zdjęcie SEM spoiwa LUDOX AM30.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wyniki pomiarów lepkości względnej badanych mieszanek. W przypadku mieszanek przeznaczonych na pierwszą warstwę założono przygotowanie mas lejnych o zawartości fazy stałej wynoszącej 65%, 70% i 75% wagowych. Mieszanki na pierwszą warstwę wykonane były z dwóch proszków korundowych 325 i 200 mesh, w stosunku 1:1, oraz glinianu kobaltu (kilka procent). Przez tydzień codziennie sprawdzano lepkość względną mieszanek. Dla wszystkich zawiesin lepkość zmniejszała się w trakcie trwania cyklu pomiarowego, co jest typowe dla tego typu systemów formierskich. W wyniku badań okazało się, że masy lejne o udziałach fazy stałej wynoszących 65% i 70% wag. charakteryzowały się zbyt małymi lepkościami, natomiast mieszanka zawierająca 75% wag. proszku zbyt dużą i nieakceptowalną lepkością. Z tego względu przygotowano kolejną zawiesinę o udziale proszku wynoszącym 72,5% wag. Stężenie to okazało się odpowiednie i dalsze badania wykonywano na tej masie lejnej.

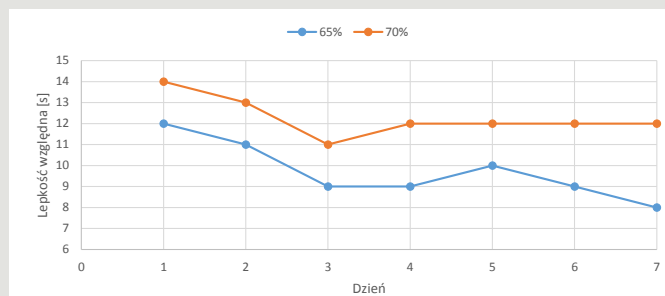


Rys. 3. Wyniki zmian lepkości względnej mas formierskich z korundu o wielkości cząstek 325 i 200 mesh wziętych w stosunku 1:1, przeznaczonych na pierwszą warstwę. Zawartość proszku wynosiła 65%, 70%, 72,5 i 75% wagowych.

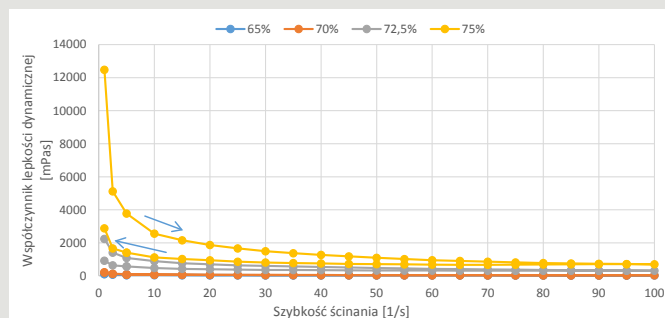
W przypadku gęstw przeznaczonych na warstwy konstrukcyjne przygotowano dwie kompozycje z glinokrzemianu o ilościach fazy stałej wynoszących 65% i 70% wagowych. W przypadku wyboru masy na warstwy konstrukcyjne korzystną okazała się gęstwa zawierająca 70% wag. proszku, której lepkość względna ustabilizowała się czwartego dnia na poziomie 12 s. Z tego względu zawiesinę tę wybrano do dalszych badań. Przy porównaniu uzyskanych lepkości względnych mas na pierwszą warstwę (72,5% wag.) oraz na warstwy konstrukcyjne (70% wag.), widać różnicę lepkości obu zawiesin

spowodowaną różnym stężeniem fazy stałej, składem oraz rodzajem użytego proszku. Lepkość zawiesiny przeznaczonej na warstwę przy-modelową mieściła się w zakresie 21–31 s, natomiast na warstwy konstrukcyjne zawierała się w zakresie 11–14 s, ostatecznie stabilizując się na 12 sekundach. Otrzymane wyniki są akceptowalne przez przemysł odlewniczy i lotniczy (np. do odlewania części silników lotniczych).

Na rysunkach 5–6 przedstawiono wyniki badań lepkości dynamicznej, które korespondują z uzyskanymi wynikami lepkości względnej. Zgodnie z oczekiwaniami, wraz ze zwiększeniem ilości fazy stałej zwiększała się lepkość dynamiczna mas formierskich.



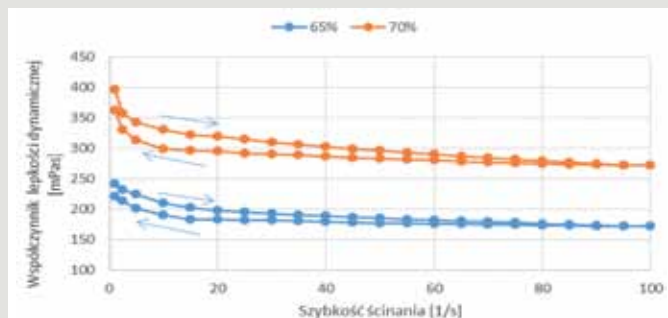
Rys. 4. Wyniki zmian lepkości względnej mas formierskich opartych na proszku glinokrzemianu (Remasil 60) przeznaczonych na warstwy konstrukcyjne. Zawartość proszku wynosiła 65% i 70% wagowych.



Rys. 5. Porównanie lepkości dynamicznej badanych mieszanek formierskich z korundu o wielkości cząstek 325 i 200 mesh, wziętych w stosunku 1:1, przeznaczonych na pierwszą warstwę. Zawartość proszku wynosiła 65%, 70%, 72,5 i 75% wagowych.

Zawiesiny cechowały się różną lepkością, charakterem tiksotropowym i niepełnymi pętlami histerezy, co oznacza, że struktura wewnętrzna mas lejnych zniszczona ścinaniem nie została w pełni odbudowana podczas zmniejszania obrotów wrzeczona w badanym zakresie. Jednakże w przypadku procesów formierskich fakt ten nie jest uciążliwy, ponieważ w warunkach przemysłowych masy lejne mieszane są w trybie ciągłym, nawet przez kilka tygodni (minimum 3), a proces nakładania kolejnych warstw metodą zanurzania zestawu jest szybki i nie przekracza kilkunastu sekund. Masy formierskie w praktyce przemysłowej, po uzyskaniu akceptowalnych parametrów lepkości i adhezji do płyty, mieszają się ok. tygodnia, a przez następne wykorzystywane są do produkcji form odlewniczych.

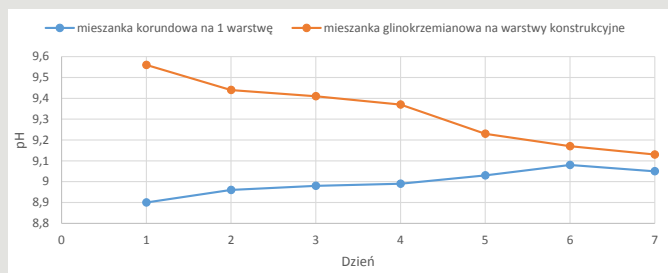
Lepkość dynamiczna mas lejnych z glinokrzemianu o zawartości 60% wag. mieści się w granicach 241–172,5 mPa·s przy wzrastającej szybkości ścinania, a przy zmniejszającej się szybkości ścinania: 172,5 do 221 mPa·s. Zwiększenie udziału proszku glinokrzemianowego o 5% wagowych wpływa na zwiększenie lepkości masy formierskiej o ponad 60% w całym zakresie pomiarowym. Współczynnik lepkości dynamicznej zawiesiny o zawartości 70% wag. glinokrzemianu zawiera się w przedziale: 396–271,5 mPa·s przy wzrastającej szybkości ścinania oraz w granicach: 271,5 do 362 mPa·s



Rys. 6. Porównanie lepkości dynamicznej badanych mieszanek formierskich z glinokrzemianu (Remasil 60) na warstwy konstrukcyjne. Ilość fazy stałej w masach lejnych wynosiła 65% i 70% wagowych.

przy malejącej szybkości ścinania. Graniczne wartości lepkości dynamicznej odpowiadają szybkościom ścinania wynoszącym 1 oraz 100 1/s.

Po doprowadzeniu mieszanek do wymaganego zakresu lepkości względnej raz dziennie określano ich pozostałe parametry. Badania właściwości mas formierskich prowadzono 24 godziny po rozpoczęciu mieszania i kontynuowano przez 7 kolejnych dni.

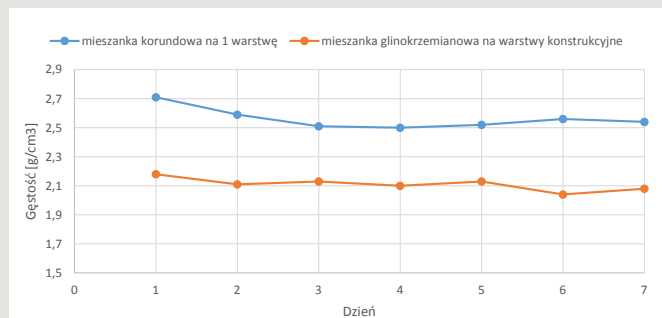


Rys. 7. Porównanie lepkości dynamicznej badanych mieszanek formierskich z korundu o wielkości cząstek 325 i 200 mesh, wziętych w stosunku 1:1, przeznaczonych na pierwszą warstwę. Zawartość proszku wynosiła 65%, 70%, 72,5% i 75% wagowych.

Na rysunku 7. przedstawiono wyniki zmian pH mas formierskich w czasie trwania cyklu pomiarowego. Jak widać, odczyn zawiesiny na warstwy konstrukcyjne wykazywał tendencję malejącą w zakresie 9,60–9,13, natomiast dla warstwy przymodelowej pH stopniowo rósł od 8,90 do 9,05 w cyklu pomiarowym. Różnice odczynu wynikały z rodzaju zastosowanych proszków, ich udziału w masach lejnych oraz stosunkowo długich procesów stabilizacji systemów formierskich w czasie.

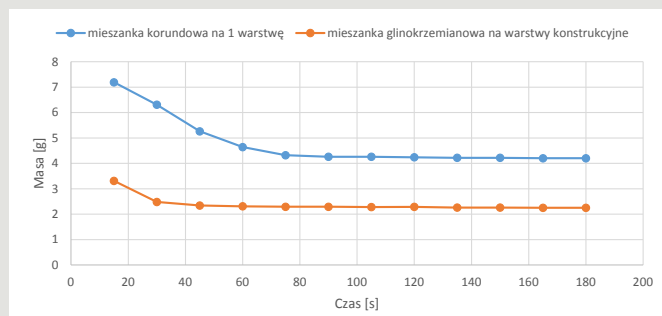
Na rysunku 8. przedstawiono porównanie gęstości mieszanek na warstwę przymodelową oraz na warstwy konstrukcyjne, których wartości maleją w cyklu pomiarowym wraz z trwającym procesem stabilizacji zawiesin. Gęstość masy korundowej na pierwszej warstwę jest większa niż masy leejnej otrzymanej na bazie glinokrzemianu, co wynika zarówno z większej zawartości fazy stałej, jak również z różnic gęstości rzeczywistej obu proszków  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (3,9 g/cm<sup>3</sup>) i glinokrzemianu (3,1 g/cm<sup>3</sup>). Zawiera się ona w przedziale 2,7–2,5 g/cm<sup>3</sup>, przy czym siódmego dnia testów wyniosła ostatecznie 2,54 g/cm<sup>3</sup>. Z kolei gęstość zawiesiny na warstwę konstrukcyjną wykonanej na bazie glinokrzemianu (Remasil 60) malała w zakresie 2,18–2,04 g/cm<sup>3</sup>, osiągając ostatniego dnia pomiarów wartość 2,08 g/cm<sup>3</sup>. Zmniejszenie gęstości zawiesin mogło być spowodowane częściowym rozbięciem aglomeratów proszku ceramicznego w trakcie mieszania zawiesin.

Istotnymi parametrami mas formierskich są obciekanie i ich adhezja do podłoża (płyty mosiężnej). Na rysunku 9. przedstawiono wyniki obciekania (tzw. „test płyty”) gęstw formierskich przeznaczonych



Rys. 8. Porównanie zmian gęstości mieszanek: na pierwszą warstwę (korund, zawartość fazy stałej – 72,5% wag.) oraz na warstwy konstrukcyjne (glinokrzemian, zawartość fazy stałej – 70% wag.).

na warstwę pierwszą oraz warstwy konstrukcyjne. Jest to standardowe badanie realizowane w warunkach produkcyjnych, tyle że na płycie trzykrotnie większej niż wykorzystywana w niniejszych badaniach. Badanie daje szybką, wizualną odpowiedź na zachowanie się zawiesiny i pokrycie modelu. Z uwagi na czytelność przedstawiono wyniki dla obu zawiesin wykonane w ostatnim dniu pomiarowym, jednakże sposób postępowania był analogiczny. Również przebieg krzywych obciekania był porównywalny. Z uzyskanych wyników widać, że ilość pozostałej masy przeznaczony na pierwszą warstwę na płycie mosiężnej jest około dwukrotnie większa, niż osadzona ilość mieszanek przeznaczony na warstwy konstrukcyjne. Wynika to z faktu, iż zawartość fazy stałej oraz lepkość kompozycji korundowej jest większa (rysunki 3, 5) niż dla zawiesiny opartej na proszku glinokrzemianowym i przeznaczony na warstwę konstrukcyjną (rysunki 4, 6).



Rys. 9. Porównanie krzywych obciekania mieszanek: na pierwszą warstwę (korund, zawartość fazy stałej – 72,5% wag.) oraz na warstwy konstrukcyjne (glinokrzemian, zawartość fazy stałej – 70% wag.), (tzw. „test płyty”).

Jest to o tyle istotne, że jej zadaniem jest nadanie wytrzymałości, trwałości, szczelności warstwie niezbędnej do równomiernego pokrycia płyty mosiężnej (w przypadku fazy badawczej w skali laboratoryjnej) oraz modelu woskowego (w warunkach przemysłowych). Przygotowane masy zapewniały dobre pokrycie płyty i jej naroży, bez zacieków, zapowietrzeń ani rozwarstwień. Również po wysuszeniu mieszanek stwierdzono ich dobrą adhezję do powierzchni płyty. Otrzymane warstwy były szczelne i dobrze przylegały do mosiężnej powierzchni. Zakłada się, że w przypadku uzyskania odpowiednich wyników pokrycia płyty, analogicznego efektu można spodziewać się w przypadku pokrycia modelu woskowego oraz warstwy formy kolejną warstwą ceramiczną uzyskaną przez zanurzenie wyrobu w masie formierskiej.

## Podsumowanie

Jednym z celów pracy i wymogów przemysłowych było uzyskanie mas formierskich opartych na proszkach korundu oraz glinokrzemianu (Remasilu 60), o możliwie dużej zawartości proszku ceramicznego



i jednocześnie akceptowalnej lepkości, tak by można je było zastosować jako warstwy przymodelowe (masa korundowa) oraz konstrukcyjne (masa glinokrzemianowa) form odlewniczych. Przedstawiono wyniki badań ceramicznych mas lejnych z udziałem spoiwa nanokompozytowego zawierającego koloidalny  $\text{SiO}_2$ . Nanokompozyt pełnił rolę rozcieńczalnika i zarazem spoiwa konstrukcyjnego mającego zadanie nadania odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej formie odlewniczej w stanie surowym, po obróbce termicznej oraz w procesie zalewania ciekłym metalem. Najkorzystniejsze wyniki otrzymano dla masy formierskiej na warstwę przymodelową, której stężenie fazy stałej (korundu) wynosiło 72,5% wag. oraz dla kompozycji na warstwy konstrukcyjne, gdzie zawartość proszku (glinokrzemianu) wyniosła 70% wagowych.

Oba systemy formierskie (masy lejne) spełniały podstawowe parametry technologiczne w odniesieniu do lepkości względnej mierzonej kubkiem czerpalnym Zahna. Lepkość gęstwy przeznaczony na pierwszą warstwę wyniosła 21 s, a na warstwy konstrukcyjne 12 s, co odpowiada przykładowym wartościom współczynnika lepkości dynamicznej odpowiednio: 320 i 296  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ , dla obu zawiesin przy szybkości ścinania wynoszącej 50  $1/\text{s}$ .

Masy lejne charakteryzowały się także bardzo dobrym pokryciem płyty mosiężnej, zarówno na płaskich obszarach, jak i na krawędziach.

Praca ma charakter aplikacyjny i stanowi podstawę do dalszych badań nad procesem przygotowania ceramicznych mas lejnych przeznaczonych na potrzeby przemysłu odlewniczego i lotniczego.

## LITERATURA

- [1] Haratym R., Biernacki R., Mysza D., 2008, *Ekologiczne wytwarzanie dokładnych odlewów w formach ceramicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- [2] Jones S., Juan C., 2003, *Advances in shell moulding for investment casting*, „Journal of Materials Processing Technology”, s. 135
- [3] Haratym R., 1997, *Procesy odlewania precyzyjnego w formy odlewnicze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
- [4] Lewandowski J. L., 1997, *Tworzywa na formy odlewnicze*, Wydawnictwo Akapit, Kraków
- [5] Ferenc J., Matysiak H., 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
- [6] Wiśniewski P., Małek M., Mizera J., Kurzydłowski K. J., 2017, *Effect of adding water-based binders on the technological properties of ceramic slurries based on silicon carbide*, „Materials and Technologies”, 51 (2), DOI: 10.17222/mit.2015.194
- [7] Małek M., Wiśniewski P., Matysiak H., Zagórska M., Kurzydłowski K. J., 2014, *Technological properties of SiC-based ceramic slurries for manufacturing investment casting shell moulds*, Archives of Metallurgy and Materials 59 (3), DOI: <https://doi.org/10.2478/amm-2014-0180>
- [8] Małek M., Wiśniewski P., Szymańska J., Mizera J., Kurzydłowski K. J., 2016, *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
- [9] Matysiak H., Ferenc J., Michalski J., Lipiński Z., Jakubowicz G., Kurzydłowski K. J., 2011, *Porowatość i wytrzymałość form ceramicznych wykorzystywanych w procesie odlewania precyzyjnego metodą Bridgmana*, „Inżynieria Materiałowa”, nr 1
- [10] 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
- [11] Koraliński M. K., Wiśniewski P., Moszczyńska D., Sitek R., Mizera J., 2017, *Ocena czasu suszenia pierwszej i drugiej warstwy ceramicznej formy odlewniczej z wykorzystaniem kamery termowizyjnej*, „Glass and Ceramics”, 2017 (1)
- [12] Wiśniewski P., Małek M., Sitek R., Matysiak H., Kurzydłowski K. J., 2014, *Technologiczne właściwości mas formierskich z SiC z przeznaczeniem dla ceramicznych form odlewniczych dla przemysłu lotniczego*, „Szkoło i Ceramika”, nr 3/2014, ss. 11–15
- [13] [www.blayson.com](http://www.blayson.com)

## ARTYKUŁY NAUKOWE

Nowe technologie, odkrycia historyczne, prace badawcze – artykuły naukowe w naszym czasopiśmie są recenzowane i otrzymują 7 pkt. w ocenie MNiSW.

Informacje dla autorów: [www.szklo-ceramika.pl](http://www.szklo-ceramika.pl)

Materiały można przesyłać na: [redakcja@szklo-ceramika.pl](mailto:redakcja@szklo-ceramika.pl)

**S+C**  
Szkoło i Ceramika

**7 PKT**  
w ocenie MNiSW

Nie wystarczy czytać czasopismo,  
trzeba z nim współpracować