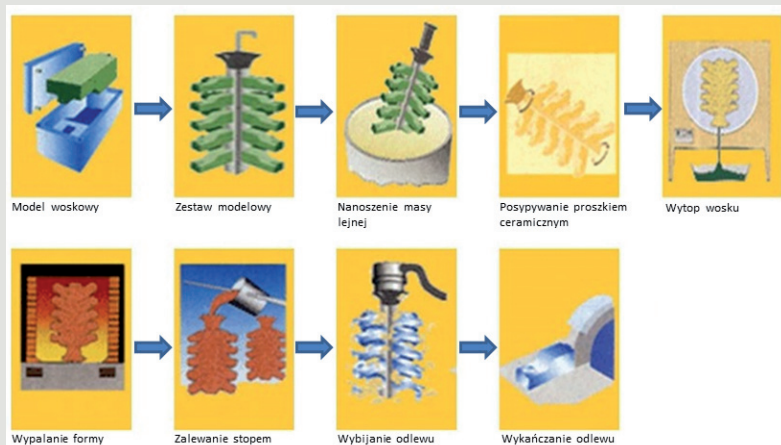


Ocena czasu suszenia pierwszej i drugiej warstwy ceramicznej formy odlewniczej z wykorzystaniem kamery termowizyjnej

MGR INŻ. MATEUSZ KONRAD KORALNIK, DR INŻ. PAWEŁ WIŚNIEWSKI,
DR INŻ. DOROTA MOSZCZYŃSKA, DR INŻ. RYSZARD SITEK,
PROF. NZW. DR HAB. INŻ. JAROSŁAW MIZERA
POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ

Wprowadzenie

Na przestrzeni lat obserwuje się dynamiczny rozwój przemysłu odlewniczego, który staje się coraz bardziej ekologiczny i umożliwia wytwarzanie odlewów o coraz bardziej skomplikowanych kształtach i wysokich właściwościach użytkowych. Do najważniejszych można zaliczyć odlewanie precyzyjne metodą traconego wosku. Metoda ta w ostatnich latach należy do najbardziej rozwijających się technik formowania. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest rosnące zapotrzebowanie przemysłu na produkty o skomplikowanych, niesymetrycznych kształtach przy zachowaniu odpowiednich tolerancji wymiarowych [1, 2]. Głównymi odbiorcami tak wymagających części są



Rys. 1. Schemat procesu odlewania precyzyjnego [3].

SŁOWA KLUCZOWE

ceramiczne formy odlewnicze, masy formierskie, nano SiO₂, suszenie, termowizja

KEYWORDS

shell moulds, slurries, investment casting, nano SiO₂, drying, thermovision

przede wszystkim następujące branże przemysłu: zbrojeniowa, energetyczna i lotnicza. Wykonanie ceramicznych form odlewniczych jest procesem skomplikowanym, pracochłonnym, długotrwałym i w dużej mierze determinuje rozwój wyżej wymienionego przemysłu. W zależności od skomplikowania i gabarytów, wytworzenie jednej formy może trwać nawet kilka dni. Schemat wieloetapowego procesu formowania metodą „zanurz-posyp” przedstawiono na rysunku 1 [1].

mgr inż. Mateusz Konrad Koralnik



Doktorant w Zakładzie Projektowania Materiałów na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej. Obszar jego pracy naukowej obejmuje zagadnienia związane z procesem odlewania precyzyjnych części silników lotniczych w tym: badania nadstopów niklu, analizę właściwości ceramicznych form odlewniczych oraz mas formierskich.
e-mail: mateusz.koralnik@gmail.com

STRESZCZENIE

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące oceny czasu suszenia przymodelowej oraz konstrukcyjnej warstwy ceramicznej formy odlewniczej. W celu wykonania pomiarów wytworzono dwie testowe masy lejne, które posłużyły do wytworzenia odpowiednio pierwszej oraz konstrukcyjnej warstwy formy ceramicznej. Do wykonania mas formierskich zastosowano proszki tlenku glinu i wodne spoiwo na bazie krzemionki koloidalnej. Mikrostrukturę proszków badano przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego, natomiast rozmiar cząstek określono przy pomocy analizatora laserowego. Gęstwy, które wykorzystano do budowy badanych warstw ceramicznej formy odlewniczej, przygotowano w mieszadzie mechanicznym. Ich parametry, takie jak: temperatura, pH, lepkość względna i dynamiczna, były odczytywane przez pięć dni z rzędu. Pomiary termowizyjne przeprowadzono w pomieszczeniu o kontrolowanej temperaturze i znanej wilgotności. Wykazano, że formy ulegają całkowitej dehydratacji w momencie osiągnięcia temperatury otoczenia.

SUMMARY

Thermovisual estimation of the time necessary for drying the two outer layers of a ceramic casting die

The paper evaluates the drying time of two layers (model and constructional) of ceramic casting dies. The slurries were prepared using the aluminum oxide and a colloidal silica-based water binder. The constituents were examined in a scanning electron microscope (SEM), their particle size was determined in a LA-950 analyzer. Then, they were mixed in a mechanical mixer and the properties of the mixtures, such as the temperature, pH, as well as relative and dynamic viscosity were monitored using a thermo-visual camera during five consecutive days. After reaching the ambient temperature, the dies appeared to be fully dehydrated.

Proces wytwarzania formy (rys. 1) zaczyna się od wykonania modelu woskowego i połączenia go w zestaw modelowy. Kolejnymi krokami są cykliczne zanurzenie modelu w masie formierskiej i posypywanie go proszkiem o odpowiedniej gradacji. Po wyschnięciu nałożonej warstwy formę pokrywa się następną. Po zakończeniu procesu formowania woskowy model wytapia się pod działaniem gorącej pary wodnej w autoklawie. Następnie forma przechodzi dwuetapowy proces obróbki cieplnej, po którym jest zalewana ciekłym metalem. Po zastygnięciu stopu odlew jest wybijany i poddawany wykańczającej obróbce mechanicznej.

Do wykonania ceramicznych form odlewniczych wykorzystuje się:

- proszki ceramiczne,
- spoiwa,
- materiały pomocnicze.

W zależności od przeznaczenia formy dobiera się odpowiednie składniki ceramicznej masy lejnej i posypki. Składniki te determinują żarowytrzymałość form oraz stopień rozszerzalności i przewodności cieplnej. W tabeli 1 przedstawiono przykładowe materiały ceramiczne oraz spoiwa używane w procesie wytwarzania mas lejnych oraz wielowarstwowych form ceramicznych.

Tab. 1. Składniki form ceramicznych do odlewania precyzyjnego [1, 4–6].

SKŁADNIKI FORM		
Proszki	Spoiwa	Materiały pomocnicze
1. Tlenki • Al_2O_3 • SiO_2 • MgO • ZrO_2	• krzemian etylu • żół kwasu krzemowego • Sikop • Ekosil • Ludox oraz podobne spoiwa na bazie nano SiO_2	1. Rozpuszczalniki i rozcieńczalniki • woda destylowana • aceton • alkohole
2. Inne materiały ceramiczne • krzemian cyrkonu • mullit • silimanit • szamat • wysokoglinowy		2. Spoiwa dodatkowe – modyfikatory reologiczne 3. Katalizator hydrolizy 3. Środki przeciwpienne 4. Środki zwilżające 4. Inne

Proszki ceramiczne są podstawowym składnikiem ceramicznych mas lejnych i składnikiem osnowy. Jeszcze do niedawna w Polsce najczęściej stosowanym proszkiem na formy ceramiczne była krzemionka, której zastosowanie nie pozwalało uzyskiwać odlewów o dostatecznej dokładności. Dlatego też w ostatnich latach, wraz z coraz większymi wymaganiami stawianymi odlewom, coraz częściej stosuje się glinokrzemiany, tlenek glinu oraz tlenek cyrkonu [7–9].

Kolejnym często stosowanym dodatkiem w formie proszku jest glinian kobaltu. Związek ten stosuje się jako dodatek do ceramicznej masy lejnej produkowanej na potrzeby wytworzenia warstwy przymodelowej. W trakcie procesu zalewania ciekły metal reaguje z glinianem kobaltu, wytwarzając zarodki ziaren krystalizującego stopu, co skutkuje znacznym rozdrobnieniem mikrostruktury w odlewach [10].

Spoiwa mają za zadanie związać cząstki proszku i zapewnić odpowiednie parametry masom lejnym, odpowiednio wysoką wytrzymałość gotowej formie, żaroodporność oraz łatwość formowania. Odpowiednie spoiwo ma istotny wpływ na uzyskanie gładkiej powierzchni stykającej się z odlewającym metalem. Obecnie do najszerzej stosowanych spoiw należą układy wodne na bazie krzemionki koloidalnej [11–14].

Materiały pomocnicze są dodawane do spoiw, a także do mas formierskich w celu uzyskania optymalnych właściwości reologicznych (tikotropowych), o stosunkowo małej lepkości, przy możliwie dużym udziale fazy stałej.

Parametry mas lejnych przeznaczonych do wykonania form odlewniczych zależą od wielu czynników, tj. rodzaju, kształtu i wielkości

cząstek zastosowanego proszku oraz jego budowy chemicznej i ilości spoiw polimerowych oraz środków upłynniających czy przeciwpiennych. Parametry technologiczne mas formierskich determinuje również udział dodatków organicznych, temperatury, pH, czy warunków mieszania.

Biorąc pod uwagę fakt, iż proces produkcji odlewów jest technologią złożoną i wieloetapową, a nadal niedostatecznie dobrze rozpoznaną, zastosowanie techniki termowizyjnej do kontroli i oceny właściwości formy odlewniczej w trakcie suszenia lub wygrzewania wydaje się być uzasadnione i w przyszłości ma szansę przyczynić się do zmniejszenia strat materiałowych w procesie produkcyjnym.

W artykule omówiono wyniki badań materiałów formierskich w stanie dostawy, tj. proszków oraz spoiwa konstrukcyjnego. Przedstawiono proces otrzymania oraz kontroli parametrów technologicznych dwóch mas formierskich (na pierwszą warstwę oraz na warstwy konstrukcyjne), a następnie z wykorzystaniem kamery termowizyjnej poddano kontroli proces schnięcia poszczególnych warstw.

MATERIAŁY I METODYKA BADAWCZA

Do wykonania masy lejnej, o zawartości 72,5% mas. fazy stałej, na przymodelową warstwę formy ceramicznej użyto proszków glinianu kobaltu, Al_2O_3 200 oraz 325 Mesh. Ich średnia wielkość cząstek wynosiła, odpowiednio, 93 i 38 μm . Jako spoiwa użyto wodorociekłego nanokompozytu LUDOX AM zawierającego koloidalny ditlenek krzemu o średniej wielkości cząstek 16 nm. Gęstwę na drugą warstwę, o zawartości 70% mas. fazy stałej, wykonano w oparciu o spoiwo LUDOX AM. Jako wypełniacza użyto proszku glinokrzemianowego Remasil.

Jako materiału posypki dla warstw przy modelowych użyto Al_2O_3 100# o średniej wielkości cząstek 125 μm , natomiast na posypkę warstw konstrukcyjnych wykorzystano proszek Remasil RG50 o średniej wielkości cząstek na poziomie 750 μm .

Wielkość cząstek 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. Pomiar przeprowadzono przy ustawieniu współczynnika załamania światła charakterystycznego dla Al_2O_3 . Obserwacje spoiwa przeprowadzono w mikroskopie Hitachi 5500. Próbkę rozcieńczano w alkoholu, a następnie zawieszono na błonę węglową. Odparowujący alkohol pozostawił na jej powierzchni nanocząstki wypełniacza znajdującego się w spoiwie, co pozwoliło na zbadanie go przy użyciu mikroskopu SEM. W trakcie badań zastosowano napięcie przyspieszające 30 kV. W obserwacji wykorzystano tryb przeświecalny mikroskopu (STEM) oraz detektor elektronów wtórnych rozproszonych (SE).

Pozostałe surowce obserwowano na mikroskopie Hitachi 3500N. Materiały obserwowano w kontraście elektronów wtórnych (SE) w trybach nisko- (5 Pa) i wysokopróżniowym (10^{-2} Pa). Tryby przełączano w zależności od stopnia gromadzenia ładunku przez próbkę i wybierano optymalne ustawienie indywidualnie dla każdej próbki.

Kolejnym etapem było wykonanie i przebadanie właściwości mieszanek ceramicznych. Masy zawierały 72,5% oraz 70% mas. fazy stałej. Masę lejną o wyższej zawartości fazy stałej (72,5%) zastosowano do wytworzenia pierwszej warstwy formy ceramicznej. Druga warstwa powstała z masy o zawartości fazy stałej równej 70%. Gęstwy mieszano w mieszadle mechanicznym CAT R50D przez 96 h. Codziennie kontrolowano ich parametry technologiczne: gęstość, pH, „test płyty”, czas wyptywu z kubka Zahna nr 4 oraz naprężenie ścinające i lepkość dynamiczną. Odczyn spoiw i mas formierskich zbadano przy użyciu pH-metru Sension1 firmy Hach wyposażonego w elektrodę do zawieszin. Gęstość oznaczono za pomocą

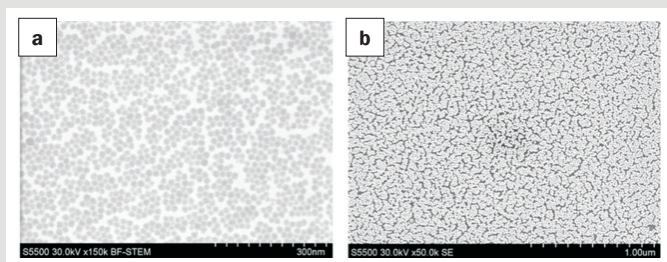
aerometru o zakresie pomiarowym do $2,5 \text{ g/cm}^3$. Do identyfikacji właściwości adhezyjnych badanych mas lejnych użyto mosiężnej płyty o wymiarach $75 \times 75 \text{ mm}$ i wadze $75,46 \text{ g}$. Test odbywał się w oparciu o następującą procedurę. Płytkę zanurzano w masie lejnej i przenoszono na zaczepek przymocowany do spodu wagi laboratoryjnej. Taki układ umożliwia swobodny odciek gęstwy. Ubytek masy gęstwy na płytce odnotowywano przez 180 s , z krokiem pomiarowym 15 s .

Do badania lepkości względnej zastosowano zanurzeniowy kubek czerpalny Zahna o średnicy dyszy $\phi = 4 \text{ mm}$. Pomiar lepkości dynamicznej przeprowadzono w reometrze MCR102 firmy Anton Paar. Korzystano z metody cylindrów współosiowych obracających się z prędkościami w zakresach $10=260$ i $260=10 \text{ 1/s}$.

Ocenę suszenia poszczególnych warstw przeprowadzono za pomocą kamery termowizyjnej VigoCam V50. Na woskowy model nanoszono wytworzoną wcześniej masę lejną o znanych parametrach technologicznych oraz określano zmiany temperatury powierzchni naniesionej gęstwy w funkcji czasu. Emisyjność ceramiki ustalono na podstawie kart pomiarowych dostarczonych razem z urządzeniem.

WYNIKI I DYSKUSJA

Zdjęcia spoiwa Ludox AM wykonane w mikroskopie elektronowym (STEM) w trybie przeświecalnym oraz elektronów wstecznie rozproszonych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zdjęcie SEM spoiwa Ludox: (A) AM BF-STEM, (B) SE.

Na zamieszczonych zdjęciach można zaobserwować nanocząstki SiO_2 w spoiwie LUDOX AM. Kształt nanocząstek jest zbliżony do kulistego (rys. 2a), natomiast polimer zawarty w układzie całkowicie pokrył powierzchnię cząstek tlenku i spowodował ich aglomerację (rys. 2b). Na podstawie pomiarów stereologicznych oszacowano, że średnia wielkość cząstek ditlenku krzemu wynosi 16 nm .

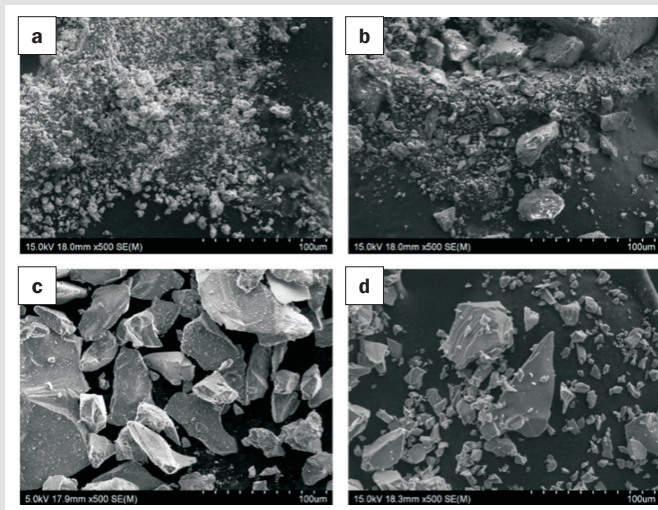
Na rysunku 3. przedstawiono przykładowe zdjęcia mikrostruktury zastosowanych proszków ceramicznych. Zastosowane proszki są materiałami rzeczywistymi stosowanymi w warunkach przemysłowych i posłużyły do wykonania ceramicznych mas lejnych na warstwie przy modelowej oraz warstwy konstrukcyjnej.

Obserwowane proszki (rys. 3) były ostrokrawędziste, a ich wielkość mocno różnicowana. Proszek glinianu kobaltu był najmocniej rozdrobniony z pośród badanych cząstek.

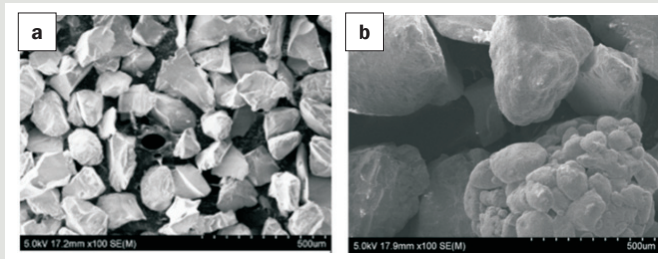
Na rysunku 4. przedstawiono wyniki obserwacji mikroskopowych materiałów ceramicznych zastosowanych na posypki pierwszej oraz drugiej warstwy ceramicznej formy odlewniczej.

Cząstki proszku $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 100\#}$ przedstawionego rysunku 4a posiadają zróżnicowany kształt oraz ostre krawędzie. W przypadku proszku Remasil RG50 (rys. 4b), który stosowano jako obsypkę warstwy konstrukcyjnej, cząstki nie posiadają ostrych krawędzi oraz gładkich brzegów. Widoczne są również aglomeraty składające się z wielu mniejszych cząstek proszku. Podstawowymi właściwościami technologicznymi mieszanek formierskich są odczyn oraz gęstość.

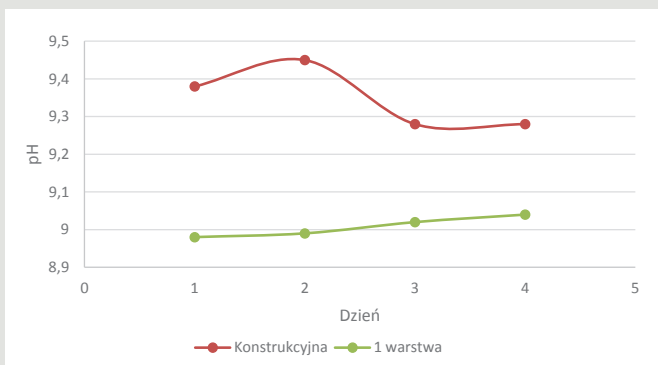
Na rysunkach 5. i 6. przedstawiono wyniki zmian pH oraz gęstości mas formierskich w czasie trwania cyklu pomiarowego.



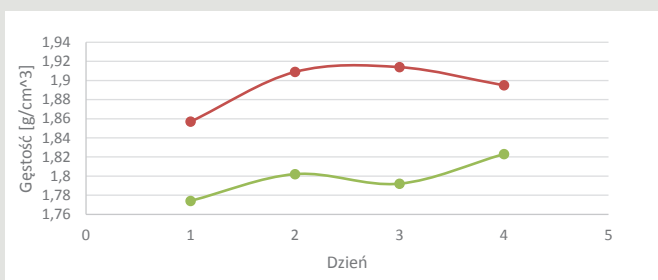
Rys. 3. Mikrostruktura cząstek proszków użytych do wytworzenia form: A – glinianu kobaltu, B – Remasil, C – $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 200\#}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 325\#}$.



Rys. 4. Zdjęcia SEM proszków $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ 100\#}$ (A) oraz Remasil RG 50 (B).



Rys. 5. Wyniki pomiaru pH badanych mieszanek.

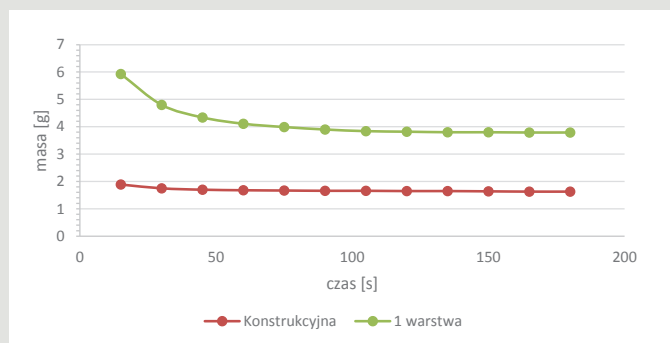


Rys. 6. Wyniki pomiaru gęstości badanych mieszanek.

Jak wynika z pomiarów przedstawionych na rysunku 5. w całym cyklu pomiarowym pH zmieniało się w zakresie od $9,4$ do $9,2$ dla masy konstrukcyjnej. Dla masy przy modelowej wartość pH była praktycznie stała w całym zakresie pomiarowym. Gęstość badanych mas lejnych jest zbliżona i wynosi $\sim 1,85 \text{ g/cm}^3$. Widoczne na

wykresie zmiany gęstości badanych gęstw są nieznaczne i sięgają setnych części grama. Z punktu widzenia procesu technologicznego takie wahania są pomijalnie małe oraz dopuszczalne.

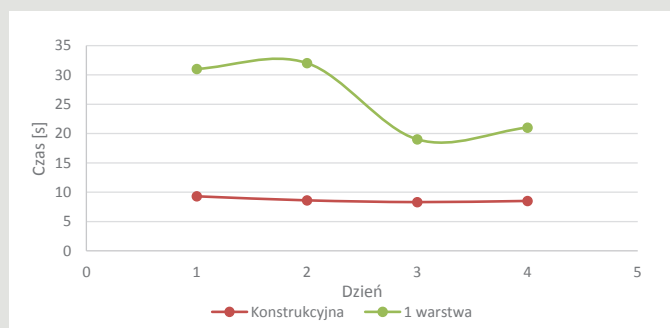
Istotnymi parametrami ceramicznych mas odlewniczych ocenianymi w branży lotniczej są: obciekanie oraz adhezja masy lejnej do podłoża, tj. płyty mosiężnej. Na rysunku 7. zaprezentowano wyniki obciekania obu mas lejnych. Testy rozpoczęto po 24 h mieszania.



Rys. 7. Krzywe obciekania (tzw. „test płyty”) dla badanych mas lejnych.

Przedstawione wyniki adhezji mas lejnych do mosiężnej płyty wskazują, iż mieszanka przy modelowa pozostaje w większej ilości na płycie względem masy konstrukcyjnej. Większa masa płytki zawierającej gęstwę na pierwszej warstwie wynika z tego, że na powierzchni mosiężnej płyty pozostała grubsza warstwa wypełniacza gęstwy niż w przypadku testu dla próbki o akronimie „Konstrukcyjna”. W przypadku badania prowadzonego dla próbki gęstwy użytej do budowy drugiej (konstrukcyjnej) warstwy formy ceramicznej mamy do czynienia z mniejszą ilością fazy stałej pozostałej na płycie.

Oszacowanie adhezji masy lejnej do płyty mosiężnej obejmuje: ocenę równomierności pokrycia powierzchni i krawędzi, grubość otrzymanej warstwy, a także jej trwałość, dobre przyleganie i odporność. Otrzymane ceramiczne masy formierskie zapewniały dobre pokrycie płyty i jej naroży bez zacieków i zapowietrzeń. Ostatnimi ocenianymi parametrami mas lejnych były lepkość względna oraz lepkość dynamiczna. Otrzymane wyniki przedstawiono na rysunkach 9–10.

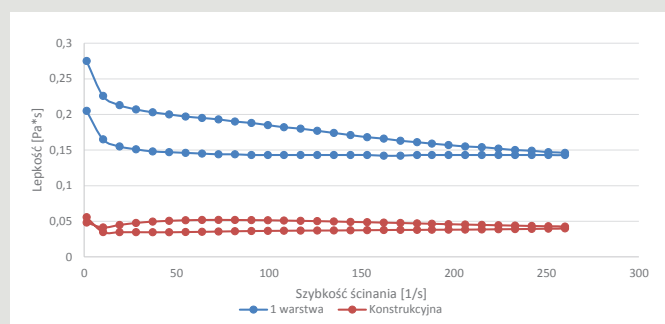


Rys. 8. Wyniki zmian lepkości względnej mas formierskich.

W przypadku mas formierskich pomiar lepkości względnej dokonywany jest kubkiem Zahna nr 4, który jest najprostszym wiskozymetrem wypływowym, a miarą lepkości jest czas wypływu zawiesiny mierzony w sekundach. Tego typu kubki są powszechnie stosowane w praktyce przemysłowej.

Badania lepkości względnej wykonanej przy pomocy kubka Zahna nr 4 pokazują zróżnicowanie gęstości obu mas formierskich. Uzyskana masa przy modelowa wykazała lepkość mierzoną czasem

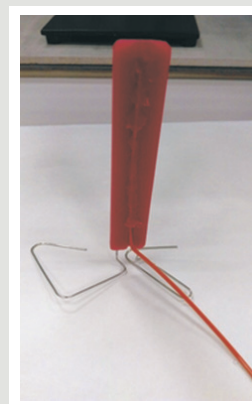
wypływu w zakresie od 30 do 18 s. Natomiast gęstwa konstrukcyjna posiadała lepkość względną określoną przy pomocy kubka Zahna nr 4 w granicy 10 sekund. Z punktu widzenia aplikacyjności wytworzonych mas lejnych jest to efekt pożądany i oczekiwany. Masa lejna stosowana na pierwszą warstwę ceramicznej formy odlewniczej powinna cechować się wyższą lepkością względem masy konstrukcyjnej. W przypadku otrzymanych gęstw uzyskano gęstość na poziomie 20 sekund na pierwszą warstwę oraz 10 na warstwy konstrukcyjne (rys. 6). Z technologicznego punktu widzenia parametry te pozwalają na wytworzenie ciągłych i równych warstw ceramicznej formy odlewniczej.



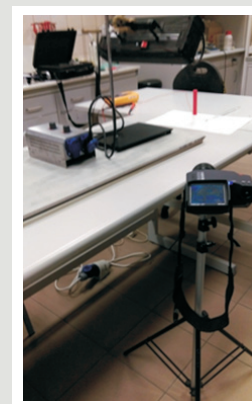
Rys. 9. Wyniki zmian lepkości dynamicznej mas formierskich w funkcji szybkości ścinania.

Z krzywych przedstawionych na rysunku 9. obrazujących wartości lepkości dynamicznej w funkcji szybkości ścinania wynika, że obie masy lejne cechują się znaczną różnicą w lepkości dynamicznej.

Na rysunku 10. przedstawiono woskową próbkę do oceny szybkości suszenia pierwszej i drugiej warstwy formy ceramicznej. Przedstawiony woskowy model pokrywano masami formierskimi i oceniano zmiany temperatury w funkcji czasu z użyciem kamery termowizyjnej (rys. 12). Zawarta w spoiwie parująca woda odbiera ciepło z objętości wytworzonej formy na woskowej próbce. Dodatkowo, termopara zatopiona w modelu woskowym pomaga potwierdzić odczyty z kamery (rys. 11).



Rys. 11. Próbkę woskową do oceny procesu suszenia metodą termowizyjną z zatopioną termoparą.

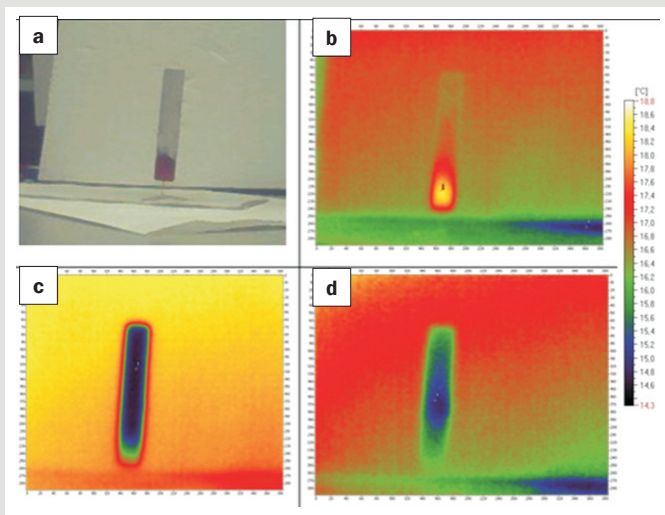


Rys. 12. Stanowisko do badań termowizyjnych.

Efektom pomiarów było otrzymanie map rozkładu temperatury w formie termogramów. Przykładowe termogramy przedstawiono dla próbki, na której przeprowadzano proces suszenia warstw (rys. 13). Parametry próby suszenia warstwy przy modelowej i konstrukcyjnej przedstawiono w tabeli 2.

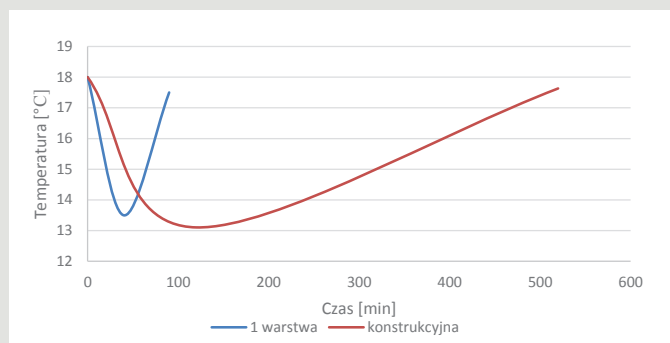
Tab. 2. Parametry próby rejestracji kinetyki procesu suszenia.

Odległość kamera – próbka [m]	Temperatura tła [°C]	Temperatura masy [°C]	Wilgotność powietrza [%]	Emisyjność
0,65	17,5	18,0	35	0,91



Rys. 13. Termogramy otrzymane w wyniku pomiarów procesu suszenia warstwy przymodelowej: A – próbka zaformowana, B – termogram próbki po formowaniu, C – próbka po osiągnięciu minimalnej temperatury, D – próbka po osiągnięciu temperatury otoczenia).

Przedstawione termogramy obrazują stopień w jakim próbka oddaje ciepło w wyniku procesu parowania wody zawartej w spoiwie Ludox AM. Na termogramie B widoczne jest lokalne przegrzanie powstałe w wyniku przekazania ciepła z rąk formierza do fragmentu próbki. Obszar C przedstawia próbkę w momencie najsilniejszego parowania. Większa część jej powierzchni osiągnęła temperaturę około 14°C, co jest wartością o blisko 4 stopnie niższą niż temperatura otoczenia. Na skrajnych obszarach testowej formy widoczne są pola o temperaturze w granicach 16,5÷17,5°C, co świadczy o odparowaniu znacznej ilości wody. Termogram przedstawiony na rysunku 13 D przedstawia próbkę, która osiągnęła temperaturę otoczenia. Świadczy to o ustąpieniu procesów parowania. Tym samym można wnioskować, że nastąpiło odparowanie większości wody zawartej w formie. Na rysunku 14 przedstawiono czas, po jakim testowe próbki, warstwa przymodelowa oraz konstrukcyjna zostały wysuszone.



Rys. 14. Wykres czasu suszenia badanych form ceramicznych.

Jak wynika z rysunku 14. obserwuje się znacznie dłuższy czas osiągnięcia temperatury otoczenia dla warstwy konstrukcyjnej, czyli drugiej warstwy badanej formy ceramicznej. Powodem takiego stanu rzeczy jest grubość otrzymanej próbki. Nałożenie warstwy

konstrukcyjnej na warstwę przymodelową powoduje nasiąknięcie pierwszej warstwy. Zatem objętość układu ulegającego dehydratacji wzrasta. Powoduje to spowolnienie przewodzenia ciepła, a tym samym utrudnia odparowywanie wody.

Wnioski

1. Zastosowanie do oceny szybkości procesu suszenia kamery termowizyjnej jest poprawne oraz potwierdza zasadność jej użycia w kontekście monitorowania procesu suszenia wielowarstwowych form ceramicznych. Technologia termowizyjna stosowana w tym aspekcie jest metodą innowacyjną oraz niosącą wiele możliwości pozwalających na poprawę jakości procesu produkcji ceramicznych form odlewniczych.

2. Otrzymane wyniki są aplikacyjne i dają podstawę do dalszych badań w tematyce odlewania precyzyjnego, dedykowanemu zwłaszcza przemysłowi lotniczemu.

PODZIĘKOWANIA

Badania realizowano w ramach Projektu Zastosowanie przestrzennej, optycznej digitalizacji, termowizji i tomografii do oceny technologicznej jakości woskowych zestawów modelowych i wielowarstwowych ceramicznych form w procesie precyzyjnego odlewania krytycznych części silników lotniczych, Nr PBS3/A5/54/2016 finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

- [1] Haratym R., Biernacki R., Myszka D. (2008), *Ekologiczne wytwarzanie dokładnych odlewów w formach ceramicznych*, Warszawa
- [2] Jones S., Juan C. (2003), *Advances in shell moulding for investment casting*, „Journal of Materials Processing”, 135, 258–265
- [3] www.blayson.com (dostęp 27.12.2016)
- [4] Haratym R. (1997), *Procesy odlewania precyzyjnego w formy odlewnicze*, Warszawa
- [5] Patent nr P-319315 (1994), *Spoivo krzemianowe nieorganiczne w wodnym roztworze EKOSIL*, Instytut Odlewnictwa w Krakowie, Instytut katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN w Krakowie
- [6] Matysiak H., Ferenc J., Lipiński Z., Garbacz K., Michalski J., Kurzydłowski K. J. (2009), *Charakterystyka i kontrola właściwości technologicznych mieszanek ceramicznych do wytworzenia form odlewniczych do odlewania precyzyjnego części turbin lotniczych metodą Bridgmana*, „Inżynieria Materiałowa”, 4, 239–244
- [7] Lewandowski J. L. (1997), *Tworzywa na formy odlewnicze*, Kraków
- [8] Ferenc J., Matysiak H., Kurzydłowski K. J. (2010), *Organic viscosity modifiers for controlling rheology of ceramic slurries used in the investment casting*, [w:] Proceedings of the 12th International Conference on Modern Materials and Technologies (CIMTEC 2010), „Advances in Science and Technology”, 70, 102–107
- [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”, 1, 17–21
- [10] Matysiak H., Zagorska M., Balkowiec A., Adamczyk-Cieślak B., Dobkowski K., Koralnik M., Cygan R., Nawrocki J., Cwajna J., Kurzydłowski K. J. (2015), *The Influence of the Melt-Pouring Temperature and Inoculant Content on the Macro and Microstructure of the IN₇₁₈ Ni-Based Superalloy*, „JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society”, 10, DOI: 10.1007/s11837-015-1672-5
- [11] 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, 919–926
- [12] Olhero S. M., Ferreira J. M. F. (2004), *Influence of Particle Size Distribution on Rheology and Particle Packing of Silica-based Suspensions*, „Powder Technology”, 139, 69–75
- [13] Kong D., Yang H., Yang Y., Weia S., Wang J. (2007), *De-stabilization mechanism and in situ solidification of alumina slurry dispersed in silica sol*, „Journal of Materials Processing Technology”, 182, 489–497
- [14] Matysiak H., Wiśniewski P., Ferenc-Dominik J., Michalski J., Kurzydłowski K. J. (2011), *Badania właściwości reologicznych ceramicznych mas lejnych do odlewania precyzyjnego części turbin lotniczych*, „Szkło i Ceramika”, 1, 10–15