

Badania właściwości mieszanek woskowych stosowanych w technologii wytapianych modeli – nowe metody badań

J. Zych ^{a*}, J. Kolczyk ^a, T. Snopkiewicz ^a

^a AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Odlewnictwa, ul. Reymonta 23, 30-059 Kraków, Polska

*Kontakt korespondencyjny: e-mail: jzych@agh.edu.pl

Otrzymano 16.04.2012; zaakceptowano do druku 02.07.2012

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań wybranej grupy mieszanek woskowych stosowanych w technologii wytapianych modeli. Wykonano badania kinetyki skurczu mieszanek i przebiegu zmian właściwości lepko-sprężystych w funkcji temperatury. Wyznaczono wpływ temperatury na wytrzymałość na zginanie mieszanek woskowych.

Słowa kluczowe: technologia wytapianych modeli, skurcz liniowy, wytrzymałość, sprężystość

1. Wprowadzenie

Wytwarzanie form ceramicznych (FC) dla odlewnictwa precyzyjnego metodą wytapianych modeli polega na cyklicznym procesie zanurzenia modelu woskowego w ciekłej masie ceramicznej, posypywaniu go gruboziarnistym materiałem ceramicznym, następnie usunięciu wosku poprzez wytopienie w autoklawie oraz suszeniu otrzymanych warstw. Kolejnym etapem jest proces wyżarzania warstwowej formy ceramicznej, aż do momentu uzyskania odpowiedniej grubości i wytrzymałości mechanicznej w zakresie temperatur od 400-1200°C.

Końcowym etapem jest proces zalewania ciekłym metalem gotowej formy oraz oczyszczenie powstałego z niej odlewu [1-5].

W przemyśle, dla opisywanej technologii, spotyka się dużą różnorodność mas modelowych. Substancje, które wchodzi w jej skład możemy ogólnie podzielić na trzy zasadnicze grupy: woski, kwasy tłuszczowe, substancje woskowe. Woski są estrami wyższych kwasów tłuszczowych monokarboksylowych oraz wyższych alkoholi jednowodorotlenowych o parzystych liczbach atomów węgla od C16 do C36. Mieszanki modelowe nie są jednorodnym materiałem. Jest to mieszanina różnych związków

chemicznych, które posiadają wspólną cechę – składają się z liniowo rozłożonych cząsteczek o zawartości od 20 do 70 grup CH. Łańcuch tych cząsteczek może mieć również budowę rozgałęzioną. Biorąc pod uwagę pochodzenie składników woskowych w mieszkach modelowych, cząsteczki te zawierają bardzo często związki ketonowe, tlenowe, alkoholowe wraz z estrami wyższych kwasów tłuszczowych [6, 7].

Bardzo ważną właściwością jest objętościowy skurcz mieszanki, który występuje podczas przechodzenia wosku ze stanu ciekłego w stan stały, co wykazali między innymi Rosenthal (1979) i Okhuysen (1998) [8, 9]. Określenie wartości skurczu wosku jest bardzo ważne dla wymiarowania i przyprowadzania modelu [10]. Jest to jeden z parametrów kontroli jego własności, który decyduje o kształcie i wymiarach modeli woskowych oraz określa przydatność danej mieszanki w procesie wytwarzania odlewów [6].

Aktualnie żadna ze stosowanych mieszanek modelowych nie ma charakteru uniwersalnej, dlatego w każdym konkretnym przypadku dobiera się ją do wymagań technologicznych. Masy samych modeli wahają się od kilku gramów do kilku kilogramów. Mieszanki modelowe, ich cechy i właściwości dobiera się uwzględniając takie parametry technologiczne jak: wielkość

odlewu (modelu), grubość ścianek, zwięzłość konstrukcji, itp. Przykładowo, do wykonania dużych modeli wybiera się mieszanki modelowe, przede wszystkim, o niskiej temperaturze topnienia i małym skurczu (liniowym i objętościowym). Ułatwia to otrzymanie modeli bez wad typu skurczowego (obciągnięć), a co za tym idzie, wydajność przy wykonywaniu modeli wytapianych zachowana jest na wysokim poziomie. Lejność, zdolność do wypełniania cienkościennych części modelu, przez mieszankę modelową w tym przypadku, pełni drugorzędą rolę.

Inne wymagania stawiane są mieszankom przy produkcji skomplikowanych, drobnych modeli. Wtedy używa się mieszanek modelowych o dużej rzadkości, czyli niskiej lepkości. Stwarza to warunki do wypełniania bardziej skomplikowanych kształtów w matrycy. Ponieważ objętość modeli jest mała, zarówno skurcz jak i czas krzepnięcia odgrywają w tym przypadku mniejszą rolę [6].

Mieszanki woskowe, przy wytwarzaniu odpowiedzialnych odlewów precyzyjnych nadają się praktycznie do jednokrotnego użytku. Po wytopieniu wosku z formy ceramicznej, można go jedynie używać do wykonywania mniej odpowiedzialnych części zespołu modelowego, np. do budowy układów wlewowych. Natomiast nie można stosować go ponownie do wyrobu masy modelowej, gdyż istnieje niebezpieczeństwo, iż zawiera cząstki obcych materiałów, czy też masy ceramicznej. Może to doprowadzić do powstania nierówności na powierzchni modelu lub innych wad powierzchniowych, co z kolei jest przyczyną ich braków [11].

2. Kryteria oceny mas modelowych

Wytwarzania mieszanek woskowych wymaga oceny całej grupy ich właściwości, które decydują o przydatności technologicznej. Zalicza się do nich wyznaczenie:

- ilości popiołu spalania,
- gęstości właściwej,
- zakresu temperatury topnienia,
- twardości najczęściej metodą penetracji igłą,
- lepkości kinematycznej (dynamicznej),
- punktu mięknięcia (metoda pierścienia i kuli),
- skurczu (rozszerzenia) objętościowego,
- zawartości wypełniaczy,
- skurczu liniowego,
- wytrzymałości na zginanie (modułu zginania).

Szczegółowe wymagania dotyczące mas modelowych zostały przedstawione przez J.I. Sklennika i V.A. Ozierowa. W pracy [12] masa spełnia podstawowe wymagania, jeżeli charakteryzują ją następujące właściwościami:

- skurcz masy przy krzepnięciu oraz rozszerzalność przy nagrzewaniu są najmniejsze i stabilne w danym zakresie temperatur,
- temperatura topnienia zawarta jest w zakresie 60÷100°C, natomiast początkowa temperatura mięknięcia jest niższa zwykle o 25÷35°C i co najmniej o 10÷20°C przewyższa o temperaturę pomieszczenia, w którym wykonywane są modele, zestawy i formy,
- masa zawiera minimalną ilość popiołu,

- czas krzepnięcia w matrycy powinien być minimalny, co można osiągnąć przez stosowanie mas o wysokiej temperaturze topnienia oraz wąskim zakresie temperatury krzepnięcia,
- po zakrzepnięciu w matrycy masa modelowa powinna posiadać twardość i wytrzymałość, które uniemożliwiają odkształcenie modeli we wszystkich operacjach technologicznych,
- reakcja chemiczna masy modelowej z materiałem matrycy oraz spoiwem form ceramicznych jest niedopuszczalna,
- masa nie powinna zmieniać swoich właściwości nawet przy kilkakrotnym użyciu,
- składniki mas modelowych nie mogą być drogie i trudno dostępne.

Mniejszy wpływ na pękanie form ceramicznych (FC) mają masy modelowe z izolatorami cieplnymi. Jest to uwarunkowane szybszym przepływem energii cieplnej przez kolejne warstwy wosku, szybkim wytopieniem wosku z zestawu modelowego oraz niższą lepkością w temperaturze topnienia.

3. Badania właściwości technologicznych mieszanek woskowych

3.1. Badania kinetyki skurczu – metodyka badań

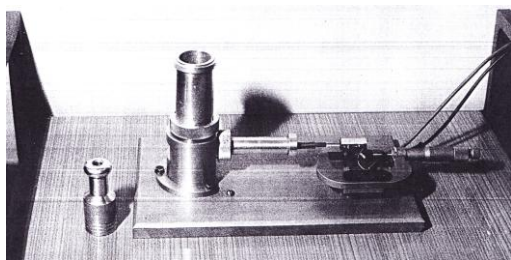
Skurcz liniowy mas modelowych określa się jako stosunek różnicy długości wneki matrycy i modelu do wielkości wneki matrycy. Wyraża się go wzorem (1):

$$\alpha = \frac{l_o - l}{l} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: α – skurcz liniowy, %;
 $l_o - l$ – różnica wymiarów wneki matrycy i modelu, mm;
 l – wymiar modelu otrzymanego w matrycy, mm;
 l_o – wymiar wneki matrycy, mm.

W dotychczasowych metodach pomiaru skurczu liniowego materiałów i mieszanek modelowych nie ma określonej jednolitej metodyki badań. Stosowane były np. kształtki o przekroju kwadratowym 10 x 10 mm o długości 200 lub 350 mm [13].

W latach 80-tych na Wydziale Odlewnictwa AGH opracowano metodę pomiaru skurczu liniowego mas modelowych (rys. 1), polegającą na pomiarze wielkości skurczu liniowego przy pomocy indukcyjnego czujnika małych przemieszczeń z rejestracją graficzną wyników przy użyciu rejestratora X-Y. Kształtka pomiarowa miała postać walca o średnicy \varnothing 15mm i długości 85 mm. Próbkę, razem z czujnikiem do pomiaru temperatury była chłodzona wodą o regulowanej temperaturze. Wyniki badań uzyskiwane były w postaci krzywych rzeczywistych kinetyki skurczu liniowego w funkcji temperatury [14].



Rys. 1. Widok aparatu do badania skurczu liniowego mas modelowych [14]

Aktualnie, również na Wydziale Odlewnictwa AGH, (Pracownia Technologii Formy), została opracowana nowa metoda badania skurczu liniowego mieszanek woskowych stosowanych na modele wytapiane. Dzięki wysokiej czułości nowej generacji czujników przemieszczeń i nowoczesnej aparaturze kontrolno pomiarowej pojawiły się nowe możliwości wykonywania precyzyjnych pomiarów przebiegów skurczu mieszanek woskowych. Na rysunku 2 pokazano wygląd nowego stanowiska pomiarowego.



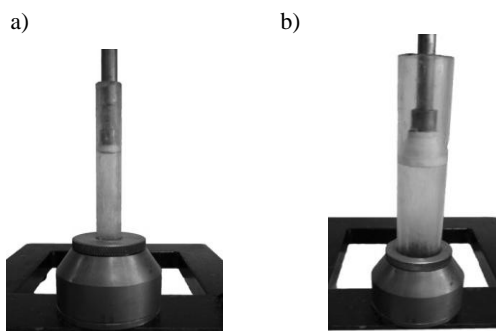
Rys. 2. Wygląd stanowisko do badań skurczu mieszanek woskowych

W jego skład wchodzi: 1 - aparat do badania skurczu liniowego wyposażony w próbnik (do zalewania i stygnięcia wosku) i elektroniczny czujnik pomiaru przemieszczeń, 2 - czujnik temperatur, 3 - miernik uniwersalny współpracujący z czujnikami temperatury i przemieszczeń, 4 - komputer rejestrujący na bieżąco wyniki pomiarów (temperatury i skurczu wosku).

Próbnik pomiarowy, pozwalający na monitorowanie skurczu wosku podczas stygnięcia wykonywany jest w dwóch wersjach, co pokazano na rysunku 3a i 3b. W trakcie pomiaru umieszczany jest on w pionowo zorientowanej sztywnej ramie. Sam próbnik składa się z: rurki wykonanej ze szkła organicznego (pleksiglasu), dolnego uchwytu z zamontowaną w osi geometrycznej próbnika termoparą oraz teflonowego tłoka zamykającego próbnik od góry. W trakcie pomiarów tłok obciążony dodatkowym ciężarkiem (rys. 2, 3) podąża za górną powierzchnią kurczącego się wosku. Przemieszczanie się tłoka jest kontrolowane przy pomocy czujnika przemieszczeń, którym może być również elektroniczna suwmiarka.

Stopka z obciążnikiem naciska na tłok próbnika pomiarowego, wywierając określony napór (ciśnienie) na masę modelową, znajdującą się wewnątrz tulejki pomiarowej.

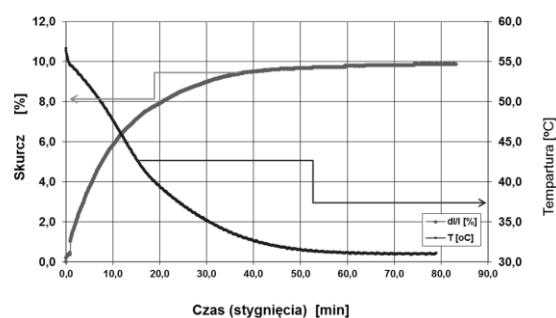
Podłączona jest również termopara w celu kontroli temperatury procesu. Cyfrowy miernik temperatury równoległe z suwmiarką zbiera dane i przesyła je do komputera. Po zakończonym badaniu obciążenie jest zdejmowane, a ramię z tłokiem podnoszone, w celu usunięcia zakrzepłej próbki z rurki. Do wykonania kolejnego badania stanowisko jest przygotowane w ten sam sposób.



Rys. 3. Próbniki do badań kinetyki skurczu mieszanek woskowych: a) z mniejszą o średnicą $d_1=11,5$ mm; b) z większą o średnicy $d_2=23,6$ mm

3.2. Wyniki badań kinetyki skurczu mieszanek woskowych

W trakcie każdego pomiaru kinetyki skurczu rejestrowane są dwie wielkości opisujące proces stygnięcia i krzepnięcia wosku w funkcji czasu: jego temperatura w osi geometrycznej próbki i skurcz (opadanie górnej powierzchni próbki pod teflonowym tłokiem). Przykładowy przebieg zmian opisywanych wielkości w funkcji czasu stygnięcia próbki pokazano na rysunku 4.

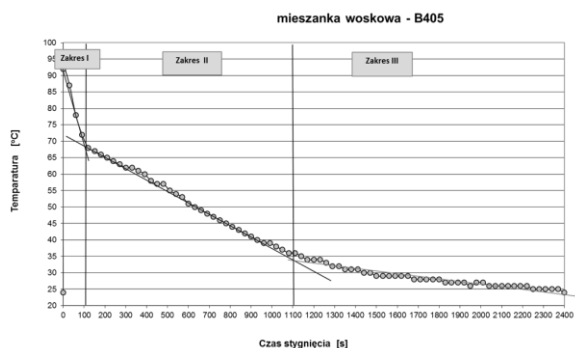


Rys. 4. Przebiegi zmian temperatury i skurczu wosku zarejestrowane na nowym stanowisku pomiarowym - przykład

Nacisk obciążnika na tłok powoduje to, iż:

- tłok podąża za ruchem górnej powierzchni wosku, związanym ze skurczem metalu
- pokonywane są opory związane z tarciem na bocznych ściankach próbnika
- kompensowany jest skurcz z kierunków prostopadłych do osi walcowej próbki. Próbką wosku przyjmuje wymiar na przekroju równy wymiarowi średnicy wewnętrznej próbnika.

Efektom takiego sposobu prowadzenia pomiarów w całym zakresie stygnięcia wosku, a więc od stanu ciekłego przez ciekło-stały aż po kontrolę skurczu podczas stygnięcia w stanie stałym, jest możliwość uzyskiwania pełnego obrazu kinetyki skurczu danej mieszanki woskowej. Rejestrowane przemieszczenie jakkolwiek odnosi się do ruchu kurczącej się objętości w jednym kierunku, faktycznie jest zapisem sumarycznego (trójwymiarowego) objętościowego skurczu mieszanki woskowej. Dlatego na osi wykresu podana wielkość „skurcz” oznacza skurcz objętościowy. Zatem, zgodnie z obowiązującą zasadą relacji pomiędzy wartościami skurczu liniowego i objętościowego - skurcz liniowy mieszanki jest trzykrotnie mniejszy od zarejestrowanego na stanowisku pomiarowym.



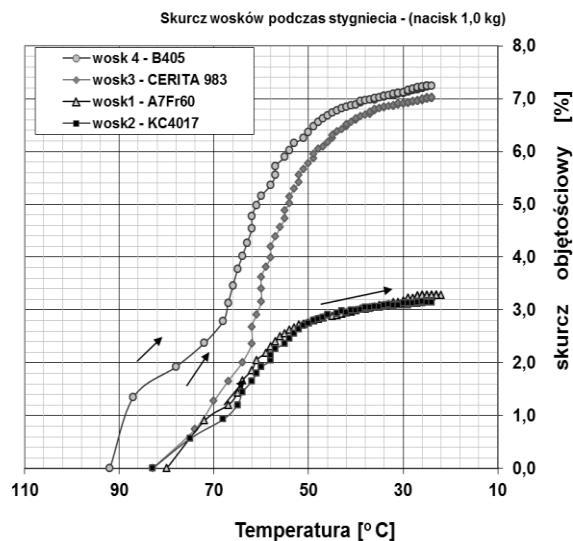
Rys. 5. Przebieg stygnięcia mieszanki woskowej B405 w próbniku ($d = 11,5$ mm) do badań kinetyki skurczu.

Na rysunku 4 przedstawiono przebieg zmian temperatury stygnącej mieszanki woskowej w zarejestrowanym próbniku do badań skurczu. Można zauważyć, iż zgodnie z oczekiwaniami nie daje się wyznaczyć temperatury topnienia, jako jednej wartości. Natomiast cały zakres zmian temperatury, z punktu widzenia szybkości tych zmian można podzielić na trzy podzakresy, zaznaczone pionowymi liniami na rysunku 5. W pierwszym zakresie obserwuje się największą szybkość stygnięcia i jest to prawdopodobnie okres, kiedy wosk występuje w stanie ciekłym w całej objętości. Porównując do metali, można by stwierdzić, iż jest to okres oddawania ciepła przegrzania. W drugim zakresie, w który wchodzi krzepnący wosk bez „przechłodzenia”, a który wystąpiłby przy krzepnięciu metali (stopów), obserwuje się zwolnienie szybkości stygnięcia. Zakres ten obejmuje dla badanego wosku temperatury od 67 do 35°C. Prawdopodobnie jest to okres krzepnięcia – odbudowy łańcuchowej struktury polimerowej. Trzeci okres to dalsze zwolnienie szybkości stygnięcia, obejmujący samo stygnięcie, ale i skurcz w stanie stałym.

Im bardziej złożone będą mieszanki, im więcej zróżnicowane długości łańcuchów cząstek polimerowych, tym bardziej należy się spodziewać długiego okresu stygnięcia.

Korzystając z danych pomiarowych, równoczesnej rejestracji temperatury i skurczu wosku można przedstawić skurcz jako funkcję temperatury mieszanki woskowej. Wykonano badania kilku przemysłowych mieszanek woskowych, których wyniki zamieszczono na rysunku 6. Badane mieszanki, z punktu widzenia wielkości skurczu objętościowego (a po przeliczeniu

liniowego) można podzielić na dwie grupy: z małym skurczem – mieszanki KC4017 i A7Fr60 oraz charakteryzujące się dużym skurczem – mieszanki B 405 i CERITA 983. Różnica w wielkości skurczu pomiędzy tymi grupami jest blisko dwukrotna.



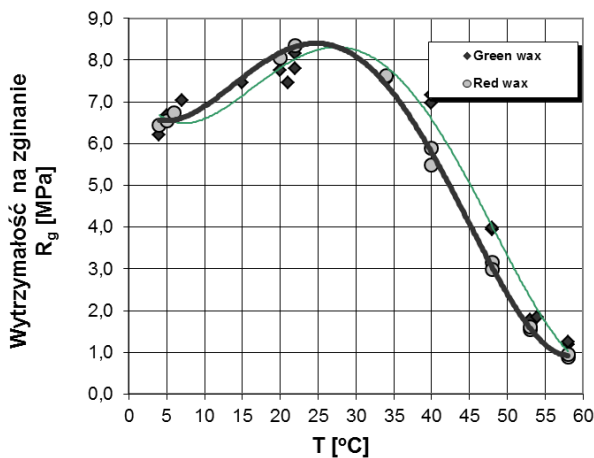
Rys. 6. Przebieg skurczu objętościowego w zakresie temperatur od 95 do 25°C dla wybranej grupy mieszanek woskowych

3.3. Wpływ temperatury na wytrzymałość na zginanie (R_g) mieszanek woskowych

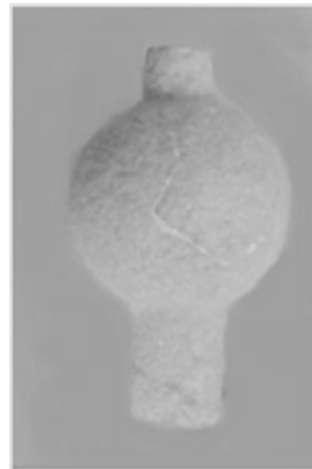
Jedną z ważniejszych właściwości technologicznych mieszanek woskowych jest ich wytrzymałość na zginanie i zależność tej wytrzymałości od temperatury. Ogólnie można powiedzieć, że praktycznie wszystkie woski w niskiej temperaturze (bliskiej $T=0^\circ\text{C}$) stają się kruche (łamliwe). Również wszystkie woski i ich mieszanki stają się praktycznie plastyczne w miarę, niewielkiego zwiększenia ich temperatury. Wosk i wytworzony z niego model woskowy, aby był przydatny technologicznie nie może być ani kruchy, ani nadmiernie plastyczny.

W pierwszym przypadku zestawy modelowe będą ulegać zbyt łatwemu obłamywaniu ich części, w drugim modele będą ulegały deformacji, uniemożliwiając wykonanie zespołu modelowego czy też naniesienie na niego powłok ceramicznych. Z tych też powodów mieszanki woskowe, przed dopuszczeniem ich do procesu technologicznego muszą mieć określoną wytrzymałość (R_g) jako funkcję temperatury $R_g = f(T)$.

Na rysunku 7 przedstawiono typowe przebiegi wpływu temperatury na wytrzymałość dwóch, dość powszechnie stosowanych mieszanek woskowych. Obie zachowują się podobnie; wytrzymałość na zginanie osiąga maksymalne wartości przy temperaturze w pobliżu 25°C. W odniesieniu dla tych mieszanek woskowych tę temperaturę należałoby uznać za optymalną technologicznie.



Rys. 7. Wpływ temperatury na wytrzymałość na zginanie wybranych mieszanek woskowych – przykład charakteru zależności $R_g = f(T)$



Rys. 8. Próba technologiczna oceny skłonności do tworzenia pęknięć form ceramicznych podczas wytapiania modelu

4. Rola skurczu (rozszerzenie) wosków w technologii wytapianych modeli

Nowoczesne technologie w zakresie wytwarzania ceramicznych form zmierzają do stosowania spoiw z wodnym rozcieńczalnikiem (krzemionki koloidalnej). Słabą stroną tej technologii są trudności z „dosuszaniem” form ceramicznych, co skutkuje uzyskiwaniem niskich wytrzymałości w stanie „na surowo”. Takie formy dużo łatwiej ulegają pękaniu przy wytapianiu modeli woskowych. Dlatego szczególnie w tym technologicznym rozwiązaniu rozszerzalność mieszanek woskowych ma duże znaczenie.

Rysunek 8 przedstawia próbę stosowaną do oceny skłonności do tworzenia pęknięć form podczas wytapiania modelu. Kulisty kształt modelu powoduje, iż podczas zwiększania objętości nagrzewanego wosku forma ceramiczna poddawana jest równomiernym naprężeniom rozciągającym. Linie pęknięć układają się wzdłuż najsłabszych miejsc z natury niejednorodnej skorupy formy.

Nieodpowiedni dobór składników mieszanki powoduje pęknięcia form (rys. 8). Kula widoczna na rysunku została celowo podświetlona w celu ich uwydatnienia. Pęknięcia spowodowane są zbyt dużą rozszerzalnością cieplną wosku i niewystarczającą wytrzymałością formy (niedosuszonej lub posiadającej zbyt małą grubość). Uszkodzona forma nie nadaje się do zalania jej ciekłym metalem. Opracowana próba ma charakter technologicznej próby dla porównawczej oceny skłonności do tworzenia pęknięć podczas wytapiania modeli.

5. Podsumowanie

Po przeprowadzeniu prac w ramach oceny poszczególnych etapów technologii wytapianych modeli oraz oceny tworzyw stosowanych można wysnuć następujące wnioski:

- technologia wytapianych modeli wymaga prowadzenia badań większej ilości właściwości, cech i parametrów niż inne technologie odlewnicze,
- opracowane i poddane testom nowe stanowisko do badań kinetyki skurczu mieszanek woskowych pozwala monitorować proces zmian objętości (skurcz objętościowy) jak i zmian wymiarów (skurcz liniowy) stygnących mieszanek woskowych,
- badania wpływu temperatury na wytrzymałość na zginanie w temperaturze około 25°C, dla zastosowanych mieszanek, wskazują na występowanie maksimum tej wytrzymałości. W tej temperaturze (jako temperaturze otoczenia) powinno się wykonywać główne operacje technologiczne takie jak: wytwarzanie modeli, budowanie zespołów modelowych, wytwarzanie form ceramicznych,
- zaproponowano nową próbę technologiczną dla oceny skłonności do powstawania pęknięć form ceramicznych podczas wytapiania modeli. W zakładach przemysłowych mogłaby ona służyć jako uzupełniająca próba ruchowa,

Literatura

- [1] Zych, J. (2009). Koncepcja badań wytrzymałości powłok ceramicznych stosowanych w technologii pełnej formy i technologii wytapianych modeli. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Odlewnictwa Metali Nieżelaznych. Nauka i technologia. Iwonicz, Polska, 117-122.
- [2] Kolczyk, J. & Zych J. (2011). High temperature strength of ceramic moulds applied in the investment casting method. *Archives of Foundry Engineering* 11(3), 121–124.

- [3] Kolczyk, J. & Zych, J. (2011). Green strength of ceramic moulds applied in the investment casting method. Materials of conference – Profuturo. Kraków, Polska, 313–318.
- [4] Karwiński, A., Wieliczko, P. & Leśniewski, W. (2006). Zastosowanie środków powierzchniowo czynnych w procesach odlewania precyzyjnego. *Inżynieria Aparatura Chemiczna* 5s, 58-60.
- [5] Lechowa, L., Stachańczyk, J. & Łepniak (1980). Odlewanie precyzyjne metodą wytapianych modeli. *Instytut Odlewnictwa*, Kraków.
- [6] Haratym, R., Biernacki, R. & Myszka D. (2008). *Ekologiczne wytwarzanie dokładnych odlewów w formach ceramicznych*. Warszawa: Oficjalne Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej.
- [7] Stachańczyk, J. (2008). *Własności charakteryzujące masy modelowe - proces kształtowania i jakości modeli wytapianych*. Praca Doktorska. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [8] Sabau, A.S. (2004). Tests for determining viscoelastic properties of investment casting waxes. Investment Casting Institute , 52ND Technical Conference & Equipment Expo.
- [9] Sabau, A.S. & Viswanathan, S. (2002). Prediction of wax pattern dimensions in investment casting. *Copyright American Foundry Society, Metals and Ceramics Division* 02(103), 1-14.
- [10] Sabau, A.S. & Viswanathan, S. (2002). Temperature measurements in wax patterns and wax-die interfacial heat transfer coefficients in investment casting. *Copyright American Foundry Society, Metals and Ceramics Division*.
- [11] Allendorf, H. (1960). *Odlewanie precyzyjne za pomocą modeli wytapianych*. Warszawa: Państwowe Wydawnictwo Techniczne.
- [12] Šklennik, J.I. & Ozierow, V.A. (1971). *Lit'e po vyplavlaemym modelam. Maszynostrojenie*. Moskwa.
- [13] Harabasz, M. (2011). *Badania kinetyki skurczu tworzyw stosowanych na modele w technologii wytapianych modeli*. Praca Magisterska. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków.
- [14] Gadowski, B. *Badania skurczu liniowego mieszanek woskowych stosowanych na wytapiane modele*. Praca Magisterska. Akademia Górniczo- Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków.

Investigations of properties of wax mixtures used in the investment casting technology – new investigation methods

Abstract

The results of testing of the selected group of wax mixtures used in the investment casting technology, are presented in the paper. The measurements of the kinetics of the mixtures shrinkage and changes of viscous-plastic properties as a temperature function were performed. The temperature influence on bending strength of wax mixtures was determined.

Key words: investment casting technology, linear shrinkage, strength, elasticity.