

# Zastosowanie reakcji fotopolimeryzacji w formowaniu ustrukturyzowanych folii ceramicznych

DR INŻ. PAWEŁ FALKOWSKI<sup>1</sup>, MGR INŻ. AGATA GRZELAK<sup>2</sup>

1. POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WYDZIAŁ CHEMICZNY, KATEDRA TECHNOLOGII CHEMICZNEJ  
2. CENTRUM NAUKI KOPERNIK

**Nowoczesne metody formowania wymagają stosowania różnego typu dodatków organicznych i nieorganicznych. Dodatki te ułatwiają proces formowania lub są czynnikiem decydującym o powodzeniu zastosowania danej metody. Niejednokrotnie powodują także obniżenie kosztów produkcji materiałów ceramicznych.**

Jedną z nowoczesnych metod formowania materiałów ceramicznych, bazującą na zastosowaniu odpowiednich związków organicznych, jest odlewanie żelowe (ang. *gelcasting*), przy pomocy którego możliwe jest otrzymywanie elementów o skomplikowanym kształcie i znacznych rozmiarach [1–3]. Metoda powstała z połączenia dwóch dziedzin nauki: chemii polimerów i ceramiki. Co wyróżnia ją z pozostałej gamy procedur formowania, to zachodząca *in situ* polimeryzacja, w wyniku której powstaje makromolekularne usieciowanie łączące cząstki ceramiczne w formowanej kształtce.

Pochodną techniką formowania łączącą ceramikę z zaawansowaną chemią organiczną jest metoda żelowania cienkich warstw ceramicznych z wykorzystaniem promieniowania ultrafioletowego (ang. *photo-gelcasting*) [4–8]. W rzeczywistości proces fotopolimeryzacji promieniowaniem UV jest adaptowany do wielu różnych metod formowania materiałów ceramicznych i polimerowych, takich jak stereolitografia, sitodruk, dwu- i trójwymiarowe drukowanie atramentami ceramicznymi i masami ceramicznymi, itp. [9–11]. Jednym z popularniejszych zastosowań mas fotoutwardzalnych jest otrzymywanie

dr inż. Paweł Falkowski



Od 2009 roku jest adiunktem na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej w Katedrze Technologii Chemicznej. Doświadczenie naukowe zdobył m.in. podczas stażu w National Institute for Materials Science

(NIMS) w Japonii. Obecnie zajmuje się badaniami nad zastosowaniem reakcji fotopolimeryzacji w formowaniu materiałów ceramicznych oraz nad formowaniem kompozytów ceramika-metal o osnowie ceramicznej. W swojej karierze naukowej zajmował się także badaniami nad cieczami zagęszczanymi ścinaniem oraz nad zastosowaniem monosacharydów i związków pochodnych jako upłynniaczy do zawieszin z nanoproszków ceramicznych.

e-mail: [falkowski@ch.pw.edu.pl](mailto:falkowski@ch.pw.edu.pl)

mgr inż. Agata Grzelak



Od 2013 roku pracuje w Centrum Nauki Kopernik, koordynując Laboratorium Chemiczne. Absolwentka kierunku Technologia Chemiczna na Wydziale Chemicznym Politechniki Warszawskiej. W ramach pracy magisterskiej zajmowała się formowaniem materiałów ceramicznych z tlenku glinu i tlenku cyrkonu z zastosowaniem światłoutwardzalnych spoiw polimerowych.

e-mail: [aganika.jawor@gmail.com](mailto:aganika.jawor@gmail.com)

## STRESZCZENIE

Materiały ceramiczne są szeroko stosowane niemalże w każdej dziedzinie nauki i techniki, jak również w życiu codziennym. Tak wszechstronne zastosowanie wynika z faktu, że posiadają one szereg unikalnych właściwości fizycznych i chemicznych, które pozwalają na wykorzystanie ich tam, gdzie wyroby z tworzyw sztucznych czy metali zawodzą. Współcześnie w technologii ceramiki nastąpił rozwój metod pozwalających na wytworzenie elementów o skomplikowanej geometrii, mających określone zastosowanie w optyce, elektronice, medycynie, przemyśle kosmicznym, itp. Jedną z tych metod jest stereolitografia, wykorzystująca reakcję fotopolimeryzacji mas ceramicznych. Zasadniczą wadą tej metody jest wysoka cena urządzeń oraz niewielkie wymiary powstających elementów. Tańszą alternatywą (mogącą w pewnych obszarach zastąpić stereolitografię), nie wymagającą zaawansowanego sprzętu i możliwą do zastosowania praktycznie w każdym laboratorium, jest połączenie metody odlewania folii ceramicznych z litografią miękką. W artykule pokazano możliwość połączenia tych technik do otrzymywania folii ceramicznej z tlenku glinu o ustrukturyzowanej powierzchni.

## SUMMARY

### Application of photopolymerization in shaping of structured ceramic tapes

Ceramic materials are widely used in almost every field of science or technology, as well as in everyday life. So versatile application of ceramic materials due to the fact that they have a number of unique physical and chemical properties allow using them in areas where polymers and metals fail. Nowadays, different shaping methods of ceramic materials with complex geometry which can be applied in optics, electronics, medicine, aerospace, etc. were developed. One of these methods is stereolithography which uses UV curable ceramic suspensions. However, the main disadvantage of this method is the high price of equipment and small size of printed elements. A much less expensive alternative which is capable to replace stereolithography in certain areas, does not require sophisticated equipment and can be used practically in every laboratory is a combination of tape casting with soft lithography. The article presents the possibility to combine these techniques in fabrication of surface-structured ceramic tapes.

## SŁOWA KLUCZOWE

fotopolimeryzacja, litografia miękka, folie ceramiczne,  $Al_2O_3$

## KEYWORDS

UV curing, soft lithography, ceramic tapes,  $Al_2O_3$

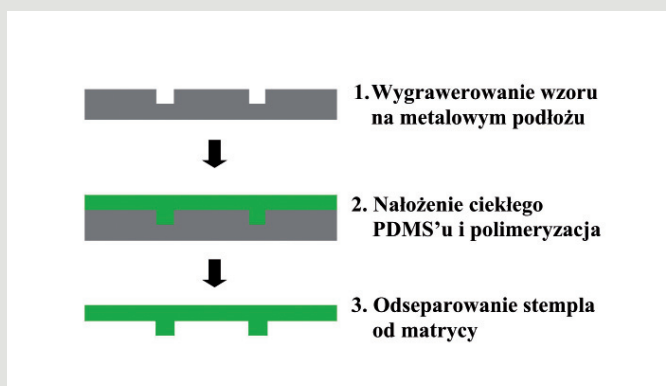
stomatologicznych kompozytowych wypełnień ceramiczno-polimerowych, gdzie cząstki ceramiczne nadają kompozytowi odpowiednią wytrzymałość mechaniczną i odporność na ścieranie [12, 13].

W metodzie *photo-gelcasting* zawieszona koloidalna proszku ceramicznego z dodatkiem reaktywnego monomeru lub masa ceramiczna składająca się z proszku ceramicznego zawieszona w reaktywnym monomerze naświetlana jest promieniowaniem UV, które spełnia rolę aktywatora reakcji polimeryzacji. Pod wpływem dostarczonej przez promieniowanie UV energii związek zwany fotoinicjatorem rozpoczyna proces polimeryzacji *in situ* w masie ceramicznej, prowadzący do jej utwardzenia. Wysokie stężenie objętościowe proszku ceramicznego w masie zmniejsza skurcz polimeryzacyjny i zapobiega tworzeniu się deformacji oraz spękań w trakcie usuwania spoiwa (fazy organicznej).

Zaletami metod wykorzystujących proces fotoutwardzania promieniowaniem UV są względnie niskie zużycie energii, szybkość i łatwa kontrola procesu fotoutwardzania, możliwość zastosowania różnego typu źródeł promieniowania UV (np. lampa metalo-halogenkowa, dioda LED UV, laser) oraz możliwość elastycznego łączenia różnych technik (procesów) ceramicznych.

Fotoutwardzalne masy ceramiczne można zastosować do formowania folii ceramicznych o ustrukturyzowanej powierzchni, np. w postaci kanałów, poprzez połączenie metody odlewania folii (ang. *tape casting*) z litografią miękką (ang. *soft lithography*). W technice *tape casting*, wykorzystującej fotoutwardzalne masy ceramiczne, proces fotopolimeryzacji zastępuje etap suszenia folii, nadając wyrobowi odpowiednią wytrzymałość mechaniczną. Otrzymana folia stanowi podłoże, na którym można generować wzór metodą litografii miękkiej przy zastosowaniu tej samej masy ceramicznej, która została użyta do otrzymania folii.

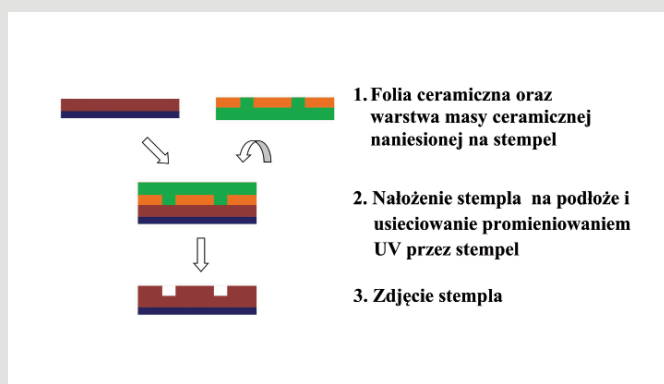
Litografia miękka, wynaleziona przez Whitesides'a i współpracowników, obejmuje szereg metod, których cechą wspólną jest powielenie wzoru za pomocą elastycznego stempla bądź maski wykonanych z przejrzystego elastomeru np. polidimetylosiloksanu (PDMS). Związek ten jest chętnie stosowany, ponieważ jest transparentny dla promieniowania UV [14, 15]. Matryca do wykonania stempla może być wytworzona kilkoma metodami, różniącymi się precyzją wykonania wzoru, rozdzielczością i ceną. Najczęściej stosowanymi technikami wytwarzania matryc jest litografia lub obróbka materiałów za pomocą komputerowo sterowanych urządzeń (CNC). Matryca może być także wykonana za pomocą grawerunku laserowego w metalu. Następnie matrycę zalewa się elastomerem, który po usieciowaniu jest od niej oddzielany. Schemat przygotowania stempla z PDMS przedstawiano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przygotowania stempla z PDMS.

Przygotowany stempel polimerowy można wykorzystać do generowania wzoru na powierzchni folii ceramicznych techniką nanoszenia wzoru. Jest to proces stosunkowo szybki i łatwy. Na stemple

umieszcza się fotoutwardzalną masę ceramiczną i przykładą do folii ceramicznej (wzorem do podłoża). Następnie masę pod stemplem naświetla się promieniowaniem UV wywołującym polimeryzację monomeru w masie. Gdy masa jest utwardzona, stempel jest oddzielany od uformowanego wzoru i powstaje gotowy półfabrykat. Schemat powielania wzoru z wykorzystaniem metody litografii miękkiej przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat powielania wzoru metodą litografii miękkiej.

W przypadku stosowania światłoutwardzalnych mas ceramicznych należy zwrócić uwagę na głębokość, do której zachodzi polimeryzacja. Jest to wielkość określająca, jak głęboko od powierzchni masy doszło do polimeryzacji; tym samym wyznacza maksymalną do uzyskania grubość folii ceramicznych. Głębokość polimeryzacji zależy od rodzaju i wielkości cząstek ceramicznych oraz od monomeru. Monomer, jak i zawieszony w nim cząstką ceramiczną pochłaniają część promieniowania, przez co zmniejsza się jego intensywność. Dodatkowo cząstki ceramiczne rozpraszają fotony i zmieniają kierunek rozchodzenia się promieniowania. Zjawiska te zmniejszają głębokość, na jaką wnika promieniowanie UV o odpowiednio dużej energii potrzebnej na rozkład fotoinicjatora na wolne rodniki. Jeżeli nałożona warstwa będzie grubsza niż maksymalna głębokość polimeryzacji, to masa ceramiczna nie ulegnie całkowicie utwardzeniu i w przypadku tworzenia układów warstwowych, czy też generowania wzoru metodą litografii miękkiej, nie dojdzie do połączenia nakładanych warstw. Tak otrzymana kształtka będzie ulegać rozwarstwianiu podczas obróbki mechanicznej (np. wycinania folii) oraz podczas spiekania.

W niniejszym artykule przedstawiono możliwości wykorzystania fotoutwardzalnych mas ceramicznych w formowaniu ustrukturyzowanych folii z tlenku glinu przy zastosowaniu połączenia technik *tape casting* i litografii miękkiej.

### Materiały stosowane w badaniach

Do badań wykorzystano tlenek glinu o symbolu A16SG firmy Almatix (Niemcy), o średniej wielkości cząstek  $0,72 \mu\text{m}$ , gęstości  $3,91 \text{ g/cm}^3$  i powierzchni właściwej zmierzonej metodą BET wynoszącej  $8,28 \text{ m}^2/\text{g}$ . Jako monomer organiczny wykorzystano nienasyconą żywicę poliestrową (NŻP) zsyntezowaną metodą polikondensacji z wykorzystaniem soli sodowej kwasu 2,3-dihydroksypropano-sulfonowego. Syntezę wykonano w Zakładzie Poliestrów, Epoksydów i Poliuretanów Instytutu Chemii Przemysłowej. Metoda syntezy została opisana gdzie indziej przez Jankowskiego i Rokickiego [16, 17]. Rozpuszczalnikiem stosowanym do obniżenia lepkości nienasyconej żywicy poliestrowej był glikol polietylenowy (PEG) firmy POCH o masie molowej  $200 \text{ g/mol}$ . Jako fotoinicjator zastosowano handlowo dostępny związek o nazwie Irgacure 500 (BASF). Związek ten jest mieszaniną benzenofenonu oraz 1-hydroksycykloheksylofenyloketonu

w stosunku wagowym 1:1. Pasma absorpcji tego fotoinicjatora mieści się w granicach 375–390 nm. Materiałem, z którego wykonywano stempel do otrzymania wzoru metodą litografii miękkiej był polidimetylosiloksan (PDMS) dostępny jako produkt handlowy pod nazwą SYLGARD® 184 (Dow Corning). Produkt występuje w postaci dwuskładnikowej. Po wymieszanu monomeru z inicjatorem, reakcji polimeryzacji i sieciowaniu w podwyższonej temperaturze (100°C) przekształca się w przezroczysty elastomer, transparentny dla promieniowania o długości fali od 240 do 1100 nm.

### Metodyka badawcza

Pierwszym etapem prowadzącym do otrzymania folii ceramicznych było wstępne przygotowanie proszku tlenku glinu poprzez zaadsorbowanie PEG na powierzchni cząstek proszku. Skutkowało to lepszym zdyspergowaniem proszku w masie ceramicznej, poprawiało właściwości reologiczne i umożliwiało wprowadzenie większej ilości proszku do masy. Wstępne przygotowanie proszku polegało na jego wymieszanu w mieszaninie glikolu z etanolem przez 30 minut w planetarnym młynku kulowym PM100 (Retsch, Niemcy) z szybkością obrotową 200 obr./min. Następnie mieszaninę poddawano wirowaniu z szybkością 10 tys. obr./min w wirówce MPW-350R (MPW Med. Instruments, Polska). Otrzymany osad suszono w temperaturze 100°C i przesiewano przez sito 0,5 mm.

Fotoutwardzalne masy ceramiczne otrzymywano przez wymieszanie wstępnie zmodyfikowanego proszku ceramicznego w mieszaninie nienasyconej żywicy poliestrowej i glikolu polietylenowego (w stosunku wagowym 1:1). Stężenie fazy stałej wynosiło od 10 do 45% obj. Ilość fotoinicjatora wynosiła 3% wag. w stosunku do masy NŻP. Składniki homogenizowano w planetarnym młynie kulowym PM100 z szybkością 350 obr./min. przez 30 min.

W celu wyznaczenia głębokości polimeryzacji fotoutwardzalną masę ceramiczną nakładano do silikonowych form i poddawano naświetlaniu promieniowaniem UV przez 180 s. Źródłem promieniowania UV była lampa metalo-halogenkowa Lasertex UV1 o paśmie promieniowania 320–450 nm i natężeniu promieniowania 130 mW/cm<sup>2</sup>. Następnie utwardzoną warstwę oddzielano, oczyszczano i mierzono jej grubość za pomocą suwmiarki elektronicznej.

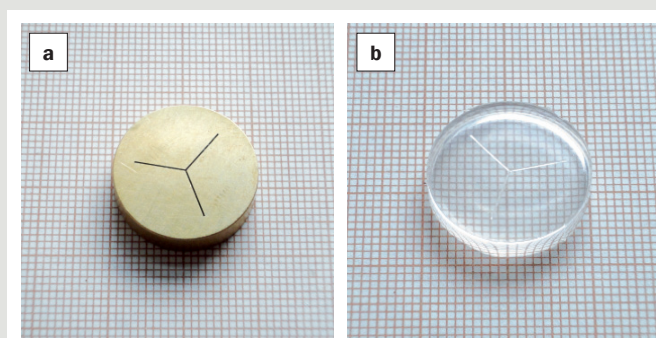
Pomiary lepkości w funkcji szybkości ścinania otrzymanych mas lejnych wykonano na reometrze Kinexus Pro firmy Malvern Instruments w geometrii płytka-płytko, przy szerokości szczeliny 300 μm. Pomiary przeprowadzono w zakresie od 1 do 500 s<sup>-1</sup>. Każdy pomiar był powtórzony 3 razy.

Folie ceramiczne stanowiące podłoże, na którym generowano wzór techniką litografii miękkiej, otrzymywano metodą odlewania folii ceramicznych. Przygotowaną masę ceramiczną wylewano bezpośrednio na folię z tworzywa sztucznego i za pomocą specjalnego noża kalibracyjnego formowano ciekłą folię. Po odlaniu, każdą folię naświetlano przez 180 s promieniowaniem UV, wskutek czego monomer ulegał polimeryzacji folie nabrały wytrzymałości mechanicznej.

Wzór kanału generowano techniką litografii miękkiej. Na wcześniej przygotowany stempel z PDMS-u nakładano niewielką ilość masy ceramicznej, odwracano go wzorem do podłoża i delikatnie dociskano. Następnie układ naświetlano promieniowaniem UV bezpośrednio przez stempel z PDMS-u, co powodowało polimeryzację masy. Po zakończeniu naświetlania stempel oddzielano od folii i otrzymywano wzór odwzieraający strukturę matrycy.

Formę do odlania elastycznego stempla z PDMS-u stanowiła mosiężna płytka, na której wygrawerowano pożądany wzór. Na płytkę nakładano ciekły PDMS i poddawano odpowietrzaniu w eksykatorze próżniowym. Proces miał na celu usunięcie pęcherzyków powietrza, które stanowiłyby punkty rozpraszania światła ultrafioletowego. Następnie materiał poddawano procesowi polimeryzacji w temperaturze 100°C w suszarce laboratoryjnej. Po zajściu reakcji, odlana

kształtka nabrała odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej i była zdejmowana z matrycy, zachowując przy tym tożsamą morfologię powierzchni. Na rysunku 3 przedstawiono mosiężną formę z powielanym wzorem oraz odlany stempel z PDMS-u.



Rys. 3. Mosiężna forma z powielanym wzorem i odlany z jej pomocą stempel z PDMS.

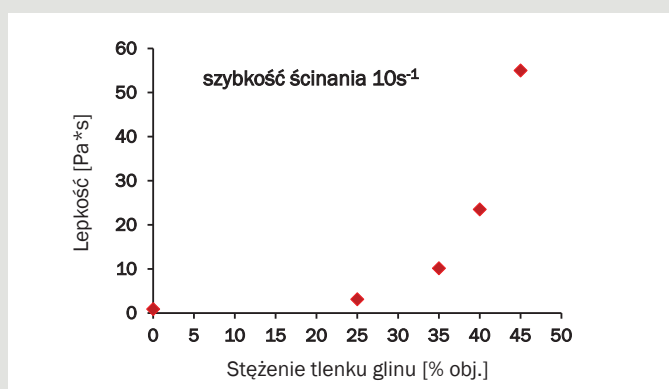
### Wyniki badań i ich dyskusja

W tabeli 1 przedstawiono wpływ stężenia objętościowego fazy stałej na głębokość polimeryzacji mas ceramicznych. Zwiększające się stężenie tlenku glinu bardzo istotnie zmniejsza maksymalną głębokość polimeryzacji. Już przy relatywnie niewielkim stężeniu fazy stałej wynoszącym 25% obj., głębokość polimeryzacji maleje 4-krotnie, by przy stężeniu 45% obj. wynieść zaledwie 210 μm. Zmniejszenie głębokości polimeryzacji wynika z efektu pochłaniania i rozpraszania promieniowania UV przez cząstki proszku ceramicznego. Zwiększająca się ilość cząstek proszku i malejące między nimi odległości powodują, że promieniowanie UV o odpowiednio dużej energii potrzebnej na rozkład fotoinicjatora na wolne radniki dociera na mniejszą głębokość. Z uwagi na fakt, że otrzymywane folie ceramiczne są poddawane później procesowi spiekania, stężenie fazy stałej powinno być jak najwyższe, aby uzyskać możliwie najwyższe zagęszczenie spieków. Należy bowiem pamiętać, że w przypadku fotoutwardzalnych mas ceramicznych podczas procesu spiekania usuwana jest cała faza organiczna stanowiąca powyżej 55% obj. materiału. Z tego względu badania głębokości polimeryzacji są istotne z technologicznego punktu widzenia, ponieważ pozwalają wyznaczyć maksymalną grubość nakładanej warstwy lub głębokość generowanego wzoru. W przypadku masy o najwyższym stężeniu tlenku glinu wynoszącym 45% obj. grubość nakładanej warstwy nie powinna przekraczać 210 μm. W rzeczywistości grubość nakładanej warstwy powinna wynosić około 80–90% maksymalnej głębokości polimeryzacji. Pozwala to zachować odpowiedni margines bezpieczeństwa, zapewniający całkowite utwardzenie masy. Także dzięki temu przy nakładaniu kolejnych warstw dojdzie do ich połączenia wskutek dopolimeryzowania jednej warstwy do drugiej, co pozwala na otrzymanie zwartej i mechanicznie wytrzymałej kształtki w stanie surowym.

Tab. 1. Głębokość polimeryzacji w masach ceramicznych o różnym stężeniu fazy stałej.

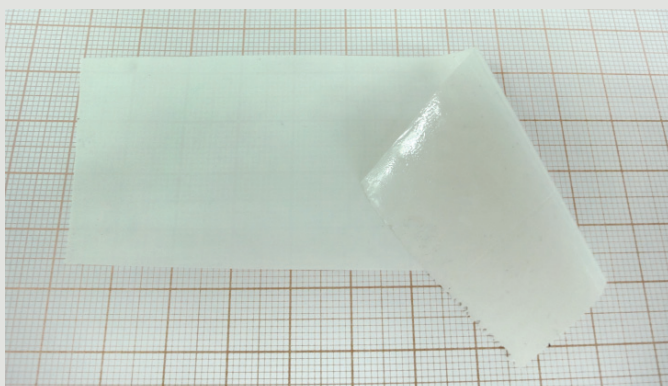
Stężenie Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [% obj.]	Głębokość polimeryzacji [μm]
0	1860
25	450
35	260
40	230
45	210

Efektywne zastosowanie fotoutwardzalnych mas ceramicznych w procesie odlewania folii i litografii miękkiej wymaga, aby charakteryzowały się odpowiednimi właściwościami reologicznymi. Głównym czynnikiem wpływającym na jakość otrzymywanych kształtek (gładkość powierzchni, jednorodność, odwzorowanie wzoru, zapowietrzenie, itp.) jest lepkość takich mas, która zależy od stężenia fazy stałej. Na rysunku 4 przedstawiono wykres lepkości przygotowanych mas przy szybkości ścinania  $10 \text{ s}^{-1}$  w funkcji stężenia objętościowego tlenku glinu. Lepkość czystej mieszaniny NŻP z glikolem, stanowiąca fazę organiczną, w której dyspergowany jest proszek ceramiczny, jest bardzo niska i wynosi 0,89 Pas. Zwiększanie stężenia fazy stałej powoduje wzrost lepkości w sposób wykładniczy. Dla największego stężenia tlenku glinu w opracowanych masach ceramicznych lepkość wynosi 55 Pas. Tak wysoka lepkość powodowała, że folie otrzymywane metodą *tape casting* nie były jednorodne i charakteryzowały się zdefektowaną powierzchnią. Z tego względu w dalszych badaniach zdecydowano się na zastosowanie fotoutwardzalnych mas ceramicznych o stężeniu 40% obj.



Rys. 4. Lepkość fotoutwardzalnych mas ceramicznych dla różnych stężeń objętościowych tlenku glinu mierzona przy szybkości ścinania  $10 \text{ s}^{-1}$ .

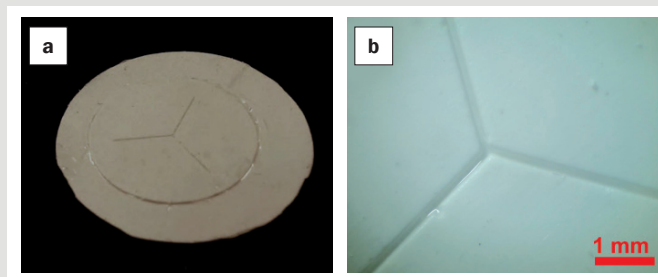
Na rysunku 5 przedstawiono utwardzoną promieniowaniem UV folię o grubości  $190 \mu\text{m}$  odlaną metodą *tape casting* z fotoutwardzalnej masy ceramicznej o zawartości 40% obj. tlenku glinu. Otrzymana folia jest elastyczna i wytrzymała, dzięki czemu można ją zastosować jako podłoże do nakładania wzoru metodą litografii miękkiej lub nakładać kolejne warstwy, jeżeli potrzebna jest folia o większej grubości. Elastyczność folii wynika z niskiej temperatury zeszczenia ( $T_g$ ) zastosowanej NŻP wynoszącej  $-3,5^\circ\text{C}$  oraz z obecności glikolu, który często jest stosowany w technologii polimerów jako zewnętrzny plastifikator.



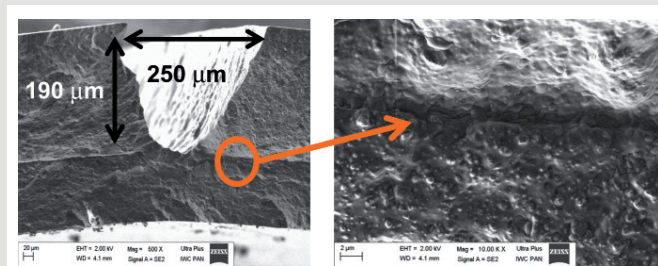
Rys. 5. Folia w stanie surowym o grubości  $190 \mu\text{m}$  odlana metodą *tape casting* z fotoutwardzalnej masy ceramicznej o zawartości 40% obj. tlenku glinu i poddana polimeryzacji promieniowaniem UV przez 180 s.

Otrzymane folie ceramiczne zostały zastosowane jako podłoże do naniesienia wzoru metodą litografii miękkiej według opisanej wcześniej procedury. Na rysunku 6 pokazano kształtkę w stanie surowym otrzymaną z masy ceramicznej z 40% obj.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  z powielonym wzorem kanałów oraz zbliżenie na uformowane kanały. Wyraźnie widać, że powielony wzór odpowiada wzorowi na stemplu z PDMS. Dodatkowo otrzymany wzór jest wyraźny i otrzymany z dużą dokładnością.

Zdjęcie z elektronowego mikroskopu skaningowego przedstawione na rysunku 7a) pokazuje przekrój otrzymanej kształtki złożonej z dwóch warstw: podłoża i warstwy ze wzorem. Grubości podłoża i warstwy ze wzorem nie przekraczają  $190 \mu\text{m}$ . Stożkowaty kształt kanału jest dokładnym odwzorowaniem reliefu na stemplu z PDMS i wynika z niedoskonałości wzoru wygrawerowanego laserem w matrycy mosiężnej. Na rysunku 7b) przedstawiono miejsce połączenia podłoża otrzymanego metodą *tape casting* z warstwą powstałą poprzez utrwalanie wzoru metodą litografii miękkiej. Warstwy te są dokładnie ze sobą połączone; nie zauważono żadnych oznak delaminacji i innych defektów na granicy łączenia. Tak dokładne połączenie się warstw wynika z faktu, że grubość warstw nie przekracza maksymalnej głębokości polimeryzacji ( $230 \mu\text{m}$ ).



Rys. 6. a) kształtki w stanie surowym z masy ceramicznej z 40% obj.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  otrzymanej przez połączenie metody odlewania cienkiej folii ceramicznej z litografią miękką; b) zbliżenia kanału w kształtce surowej otrzymanej przez zastosowanie metody litografii miękkiej.



Rys. 7. Zdjęcie przekroju foli ceramicznej z tlenku glinu z kanałem otrzymanym techniką litografii miękkiej oraz zdjęcie pokazujące obszar połączenia się dwóch warstw.

## Wnioski

Zastosowanie fotoutwardzalnych mas ceramicznych pozwala na formowanie cienkich, elastycznych i wytrzymałych folii w stanie surowym. Folie takie można wykorzystać jako podłoże do nanoszenia wzorów metodą litografii miękkiej. Zastosowanie kombinacji tych dwóch technik formowania pozwala na otrzymanie folii ceramicznych posiadających na swojej powierzchni różnego typu struktury, np. kanały. Należy jednak pamiętać, aby lepkość fotoutwardzalnych mas ceramicznych była odpowiednio dobrana, tak by możliwe było formowanie kształtek ceramicznych o dużej jednorodności i gładkości powierzchni. Stosując masy fotoutwardzalne, należy pamiętać także, aby przy nakładaniu kolejnych warstw nie przekraczać maksymalnej głębokości polimeryzacji. Dzięki temu kolejne warstwy

dopolimeryzowują do siebie, tworząc wytrzymałą mechanicznie kształtkę, którą można obrabiać mechanicznie, np. wycinać. W dalszej perspektywie połączenie opisanych technik formowania z procesem laminacji może umożliwić otrzymanie elementów ceramicznych zawierających w swojej strukturze kanały (wewnątrz). Tego typu materiały mogłyby spełniać funkcję mikroreaktorów do prowadzenia reakcji przy zastosowaniu agresywnych odczynników chemicznych lub w agresywnym środowisku.

## LITERATURA

- [1] Omatete O. O., Janney M. A., Nunn S. D. (1997), *Gelcasting: from laboratory development toward industrial production*, „J. Eur. Ceram. Soc.”, 17, 407–413
- [2] Idzkowska A, Wicinska P, Szafran M (2014), *Acryloyl derivative of glycerol in fabrication of zirconia ceramics by polymerization in situ*, „Ceram. Int.”, 40 (8), 13289–13298
- [3] Tallon C., Jach D., Moreno R., Nieto M. I., Rokicki G., Szafran M. (2007), *Gelcasting performance of alumina aqueous suspensions with glycerol monoacrylate: a new low toxicity acrylic monomer*, „J. Am. Ceram. Soc.”, 90 [5], 1386–1393
- [4] Falkowski P., Grzelak A. (2013), *Effect of solvents on curing process of photopolymerizable ceramic suspensions*, „Arch. Metall. Mater.”, 58, 1411–1414
- [5] Chartier T., Penarroya R., Pagnoux C., Baumard J. F. (1997), *Tape Casting Using UV Curable Binders*, „J. Eur. Cera. Soc.” 17 [6], 765–771
- [6] Wozniak M., Graule T., de Hazan Y., Kata D., Lis J. (2009), *Highly loaded UV curable nanosilica dispersions for rapid prototyping applications*, „J. Eur. Ceram. Soc.”, 29, 2259–2265
- [7] Chartier T., Hinczewski C., Corbel S. (1999), *UV Curable Systems for Tape Casting*, „J. Eur. Ceram. Soc.”, 19, 67–74
- [8] Tomeckova V., Halloran J. W. (2010), *Cure depth for the photopolymerization of ceramic suspensions*, „J. Eur. Ceram. Soc.”, 30, 3023–3033
- [9] Doreau F., Chaput C., Chartier T. (2000), *Stereolithography for manufacturing ceramic parts*, „Adv Eng Mater.”, 2 (8), 493–496
- [10] Dufaud O., Marchal P., Corbel S. (2002), *Rheological Properties of PZT Suspensions for Stereolithography*, „J. Eur. Ceram. Soc.”, 22, 2081–2092
- [11] Schwentenwein M., Schneider P., Homa J. (2014), *Lithography-based Ceramic Manufacturing: A Novel Technique for Additive Manufacturing of High-Performance Ceramics*, „Advances in Science and Technology”, 88, 60–64
- [12] Anand V. S., Balasubramanian V. (2014), *Effect of resin chemistry on depth of cure and cytotoxicity of dental resin composites*, „Mater. Sci. Eng., B”, 181, 33–38
- [13] Yin M., Liu F., He J. (2016), *Preparation and characterization of Bis-GMA free dental resin system with synthesized dimethacrylate monomer TDDMMA derived from tricyclo[5.2.1.0(2,6)]-decanedimethanol*, „J. Mech. Behav. Biomed. Mater.”, 57, 157–163
- [14] Xia Y., Whitesides G. M. (1998), *Soft Lithography*, „Annu. Rev. Mater. Sci.”, 28, 153–84
- [15] Qin D., Xia Y., Whitesides G. M. (2010), *Soft lithography for micro- and nanoscale patterning*, „Nat. Protoc.”, 5, 491–502
- [16] Jankowski P., Rokicki G. (2009), *Styrene-free water-thinnable unsaturated polyester resins with hydrophilic sulfonate groups for coating applications. Part I. Synthesis by polycondensation*, „Polimery”, 54, (9), 618–626
- [17] Jankowski P., Rokicki G. (2009), *Sposób otrzymywania wodorozcieńczalnych nienasyconych żywic poliestrowych, utwardzanych promieniowaniem UV metodą polikondensacji*, patent numer P-388437



**S+C**  
Szkło i Ceramika

Szanowni Państwo,

Serdecznie zapraszamy wszystkich do zamówienia prenumeraty naszego dwumiesięcznika. Szczegółowe informacje można znaleźć na stronie internetowej <http://www.szklo-ceramika.pl/prenumerata>

Gwarantujemy wiele ciekawostek ze świata nauki, sztuki i przemysłu. Przypomnimy wybitne postaci, przedstawimy historyczne miejsca. Równie gorąco zachęcamy wszystkich pracowników naukowych do nadsyłania propozycji artykułów naukowych zarówno w języku polskim, jak i angielskim.

Artykuły naukowe w naszym czasopiśmie są recenzowane i otrzymują 7 pkt. w ocenie MNiSW. Więcej informacji można znaleźć na stronie internetowej [www.szklo-ceramika.pl](http://www.szklo-ceramika.pl).

Redakcja

Tel. +22 549 9786, 739 292 707 - e-mail: [redakcja@szklo-ceramika.pl](mailto:redakcja@szklo-ceramika.pl)

**7 PKT**  
w ocenie MNiSW