

Mikołaj Szafran¹, Ewa Bobryk²

Politechnika Warszawska, Wydział Chemiczny, ul. Noakowskiego 3, 00-664 Warszawa

Katarzyna Konopka³

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej, ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa

PROJEKTOWANIE KOMPOZYTÓW CERAMIKA-METAL Z GRADIENTEM STĘŻENIA CZĄSTEK METALU

Przedstawiono metodę projektowania kompozytów ceramika-metal z gradientem stężenia cząstek metalu z wykorzystaniem sedymentacji cząstek metalu w ceramicznej masie lejnej otrzymanej z proszku ceramicznego i proszku metalu o różnej gęstości. Metoda ta polega na odpowiednim przygotowaniu ceramicznej masy lejnej składającej się z rozpuszczalnika, upłynniacza, spoiwa oraz proszku ceramicznego i proszku metalu. Sedymentacja cząstek metalu o gęstości znacznie wyższej od gęstości proszku ceramicznego pod wpływem siły ciężkości może zachodzić tylko wówczas, gdy odległości pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego w ceramicznej masie lejnej są większe od średnicy cząstek metalu (rys. 2). W pracy przedstawiono metodę oraz wyniki obliczeń odległości pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego w zależności od stężenia fazy stałej oraz średniej wielkości cząstki proszku ceramicznego. Obliczenia te wykonano przy założeniu luźnego, regularnego ułożenia cząstek. Wyniki przedstawione w tabeli 1 i na rysunku 3 wskazują, że odległość pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego maleje wraz ze zmniejszeniem średniej średnicy cząstek oraz ze wzrostem stężenia fazy stałej w ceramicznej masie lejnej. Wyniki tych obliczeń potwierdzono, przygotowując ceramiczną masę lejną z tlenku glinu oraz proszku żelazowego. Zastosowano tlenek glinu o średniej średnicy cząstek 0,5 μm i o gęstości 3,926 g/cm^3 oraz proszek żelaza o średnicy cząstek równej 4 μm i gęstości 7,81 g/cm^3 . W przypadku mas lejnych o stężeniu tlenku glinu powyżej 40% obj. nie obserwowano gradientu stężenia cząstek żelaza na wysokości kształtki otrzymanej metodą odlewania w formie gipsowej. Gradient stężenia cząstek żelaza spowodowany sedymentacją obserwuje się wówczas, gdy rozmiar cząstek żelaza w masie lejnej jest mniejszy niż odległość pomiędzy cząstkami tlenku glinu w ceramicznej masie lejnej. Metodą tą można uzyskać kształtki z gradientem nie tylko stężenia cząstek metalu, ale także z gradientem wielkości tych cząstek na wysokości kształtki. Gradient stężenia cząstek metalu może być wymuszony, gdy zastosuje się odlewanie w obecności silnego magnesu umieszczonego bezpośrednio pod formą gipsową. Pole magnetyczne powoduje ruch cząstek żelaza w kierunku magnesu.

Słowa kluczowe: kompozyty ceramika-metal, materiały gradientowe, odlewanie z mas lejnych

DESIGN OF THE CERAMIC-METAL COMPOSITES WITH GRADIENT CONCENTRATION OF METAL PARTICLES

In the paper the design of ceramic-metal composites with gradient concentration of metal particles is presented. As a method of composites fabrication the slip casting method was chosen. The process of metal particles sedimentation under gravitation force and magnetic field was used to achieve the gradient concentration of metal particles. In slip casting method the mixture of powders with addition of liquidizers, surface active agents and binders is prepared. Process of metal particles with higher density than the density of ceramic powder sedimentation under gravity force is possible when the distance between the ceramic powder particles are bigger than the size of metal particles (Fig. 2). In the paper the calculations of the distances between the particles are presented. Moreover, the correlation between the size of metal particles and the distance between ceramic particles is described. In calculations the assumption was made that there is regular distribution of free particles. Results showed that the distance between the particles decreases together with the decrease of average size of particles and with increase of concentration of solid phase in slip casting (Tab. 1, Fig. 3). Experimental results confirmed the calculations. The composites Al_2O_3 -Fe were prepared. The Al_2O_3 powder with average diameter equal to 0.5 μm and density equal to 3.926 g/cm^3 was used. The average size of Fe powder was equal to 4 μm , and its density was equal to 7.81 g/cm^3 . In case of slip casting with 40 volume % of alumina powder no gradient concentration in composites was noticed. Gradient concentration of iron particles is possible when the size of Fe particles in slip casting is lower than the distance between the Al_2O_3 particles. In such a situation when gradient concentration of metal particles can not be obtained by sedimentation method i.e. when the size of metal particles is equal or bigger than the distance between the particles, the magnetic force might be used. Magnetic force leads to gradient concentration of metal particles, moreover the metal particles are situated along the line of magnetic field.

Key words: ceramic-metal composites, gradient materials, slip casting

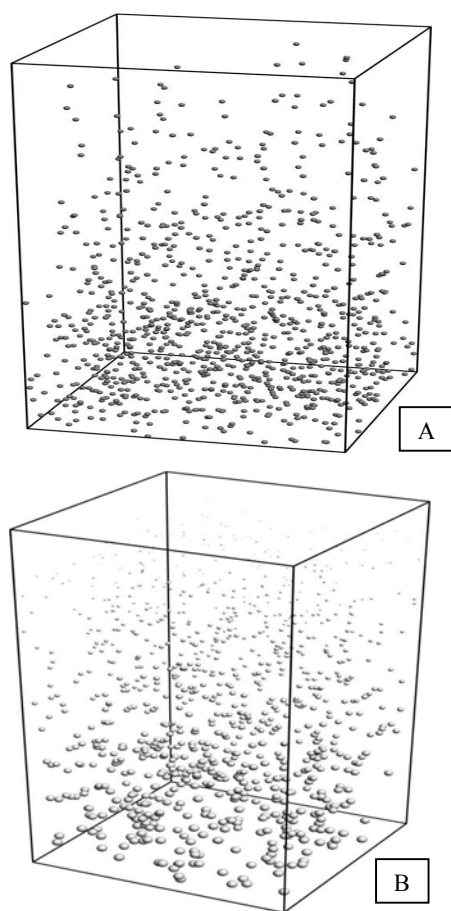
WPROWADZENIE

Kompozyty ceramika-metal należą do grupy materiałów inżynierskich o zastosowaniu zarówno jako materiały konstrukcyjne, jak i funkcjonalne. Podstawową

korzyścią połączenia ceramiki z metalem jest zwiększenie odporności na pękanie w stosunku do ceramicznej osnowy, co zapewnia dodatek plastycznego metalu. Me-

¹ prof. dr hab. inż., ² mgr inż., ³ dr inż.

tal jest przede wszystkim wprowadzany do osnowy ceramicznej w postaci cząstek. W trakcie propagacji pęknięcia, na skutek obecności cząstek metalu, dochodzi do rozpraszania energii pęknięcia i w konsekwencji zwiększenia odporności na pęknięcie [1-4]. Zmiana odporności na pęknięcie kompozytów zależy od rodzaju ceramiki i metalu, ilości wprowadzonego metalu, a także od rozmiaru i kształtu cząstek metalu oraz jednorodności ich rozmieszczenia [5-7]. Poza zmianą odporności na pęknięcie, faza metaliczna rozmieszczona w osnowie ceramicznej może wpływać na modyfikację właściwości elektrycznych, cieplnych czy też magnetycznych.



Rys. 1. Schemat kompozytu gradientowego: A - gradient stężenia cząstek metalu (czarne kropki) w osnowie ceramicznej, B - gradient rozmiaru cząstek metalu (czarne kropki) w osnowie ceramicznej

Fig. 1. Schematic view of the gradient composite: A - composite with gradient concentration of metal particles, B - composites with gradient concentration of the size of metal particles

Jednorodność rozmieszczenia cząstek metalu w osnowie ceramicznej jest parametrem, który pozwala na projektowanie kompozytów gradientowych [8]. Zmiana udziału procentowego fazy metalicznej w funkcji odległości od powierzchni materiału daje dodatkowe możliwości projektowania kompozytów zgodnie z gradientem obciążeń cieplnych i mechanicznych, wynikających z warunków pracy danego elementu. Często wymagane jest wytwarzanie elementów o zwiększonej zawartości fazy metalicznej w strefie przy powierzchni wyrobu.

Aplikacje narzucają również konieczność zmiany nie tylko procentowego udziału w objętości danego elementu fazy metalicznej, ale także gradientu rozmiaru tej fazy. Wytworzenie takiego materiału o zmiennym rozmiarze cząstek metalu pozwala dodatkowo na precyzyjne sterowanie właściwościami materiału.

Dane literaturowe, jak i prace własne wskazują, że rozmiar fazy metalicznej ma istotny wpływ na propagację pęknięcia w kompozytach [5-7, 9, 10]. Schemat kompozytu z gradientem stężenia cząstek metalu w osnowie ceramicznej przedstawiono na rysunku 1A, natomiast schemat kompozytu z gradientem rozmiaru cząstek metalu jest widoczny na rysunku 1B.

Podstawowym problemem w procesie projektowania kompozytów z gradientem jest opracowanie sposobów sterowania gradientem np. stężenia lub rozmiaru cząstek metalu w osnowie ceramicznej. Są one ściśle zależne od procesów wytwarzania kompozytów i muszą uwzględniać ich specyfikę. W prezentowanej pracy do wytwarzania kompozytu z gradientem stężenia cząstek metalu w osnowie ceramicznej wykorzystano metodę odlewania mas lejnych. Jako sposób wymuszenia gradientu stężenia cząstek metalu wykorzystano ich sedymentację w wyniku działania pola grawitacyjnego, a także pola magnetycznego. W pierwszej części artykułu przedstawiono metodę otrzymywania takich kompozytów oraz obliczenia sedymentacji cząstek metalu o gęstości znacznie wyższej od gęstości proszku ceramicznego. W drugiej części pracy przedstawiono wstępne wyniki badań zaprojektowanych i wykonanych kompozytów.

OTRZYMYWANIE KOMPOZYTÓW CERAMIKA-METAL Z WYKORZYSTANIEM CERAMICZNYCH MAS LEJNYCH

Ceramiczną masę lejną można uzyskać wprost przez zarobienie wodą mieszaniny surowców ceramicznych. Jednak taka masa zawierająca przeważnie od 55 do 70% wody nie spełnia warunków stawianych przez współczesne technologie ceramiczne. Kryterium oceny i przydatności masy lejnej stanowi uzyskanie optymalnej gęstości masy z zachowaniem odpowiedniej lepkości gęstwy i dobrej jej płynności.

Dobra masa lejna powinna charakteryzować się następującymi cechami: (1) możliwie małą zawartością cieczy (najczęściej wody); (2) dużą stabilnością z małą skłonnością do sedymentacji, (3) dużą zdolnością do tworzenia czerepu, (4) małą lepkością zapewniającą dokładne wypełnienie formy, (5) zdolnością tworzenia jednorodnego, zwartego i dostatecznie wytrzymałego czerepu, (6) dobrą lejnością, przejawiającą się tym, że przy laniu zwartej strużki znika ona na powierzchni gęstwy bez tworzenia baniek, (7) zdolnością upłynniania przy minimalnej ilości upłynniaczy, (8) szerokim zakresem upłynniania, gwarantującym zachowanie stałych wła-

ściwości gęstwy przy niewielkich wahanach dodatku upłynniacza. Aby uzyskać masę o takich właściwościach, niezbędne jest zrozumienie wpływu różnych czynników na zachowanie masy, co jest możliwe tylko przez poznanie mechanizmu poszczególnych zjawisk.

Upłynnianie, czyli „rozrzedzanie” mas lejnych, jest w rzeczywistości procesem zachodzącym w pobliżu każdej cząstki układu koloidalnego i jest efektem wzajemnych oddziaływań fazy stałej z ciekłą. Większość surowców nieplastycznych, m.in. Al_2O_3 , w zawiesinach wodnych posiada ładunek ujemny, a przy powierzchni każdej takiej cząstki powstaje podwójna warstwa elektryczna. Na warstwę podwójną składa się ładunek powierzchni cząstki oraz równoważny ładunek jonów cieczy zgromadzonych przy powierzchni cząstki. Gdy cząstka otoczona przez podwójną warstwę elektryczną jest poruszona przez ciecz, warstwa Sterna i część warstwy dyfuzyjnej poruszają się z cząstką. Jednak w obszarze warstwy Gouya istnieje płaszczyzna, gdzie zaczyna się ruch cząsteczek wody względem powierzchni fazy stałej, tzw. płaszczyzna ścinania. Potencjał w tej płaszczyźnie zwany jest potencjałem elektrokinetycznym ζ (dzeta), który można łatwo zmierzyć na podstawie badań elektrokinetycznych. Ceramiczna masa lejna oprócz fazy stałej (proszku ceramicznego, proszku metalicznego) i rozpuszczalnika (najczęściej woda) zawiera także upłynniacz lub kompozycję upłynniaczy. Rola upłynniacza polega na modyfikacji grubości i składu podwójnej warstwy elektrycznej w taki sposób, aby siły odpychania tylko w niewielkim stopniu przewyższały siły przyciągania cząstek. Zbyt duża różnica pomiędzy siłami odpychania i przyciągania prowadzi do koagulacji masy albo do zbyt niskiego stężenia fazy stałej w ceramicznej masie lejnej.

Jest bardzo wiele związków zarówno organicznych, jak i nieorganicznych spełniających rolę substancji upłynniających. Najczęściej stosowane są następujące elektrolity: (1) węglan sodu, który intensywnie upłynnia masy lejne, ale sprzyja występowaniu struktury tiksotropowej; najczęściej stosowany jest do upłynniania mas zawierających surowce z dużą ilością frakcji koloidalnej, ale niewykazujących właściwości kwaśnych; (2) poliakrylan sodu - upłynnia i stabilizuje masy zawierające w swoim składzie surowce ilaste; (3) poliakrylan amonu, który jest stosowany m.in. wtedy, gdy nie jest pożądane, aby w ceramicznej masie lejnej znalazły się jony sodu, np. żeby $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ nie przekształcił się w $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$; (4) glinian sodowy o dobrym działaniu upłynniającym i zwiększającym wytrzymałość mechaniczną czerepu w stanie wysuszonym. Ilość dodanego upłynniacza nie przekracza na ogół 1% wag. w stosunku do fazy stałej.

W przypadku ceramicznych mas lejnych przygotowanych z surowców nieplastycznych (np. Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , Si_3N_4 itp.) niezbędny jest również dodatek spoiw [11, 12]. Dobór odpowiedniego spoiwa oraz jego ilości

jest istotnym zagadnieniem w technologiach ceramicznych wykorzystujących masy lejne. Ze względu na coraz większe wymagania co do szybkości procesów ceramicznych, ich wydajności i jakości gotowych wyrobów zastosowane spoiwo może zdecydować o pozytywnym wyniku całego procesu. Gdyby nie odpowiednie spoiwa, w ogóle nie byłoby możliwe otrzymanie wielu, nieraz o bardzo skomplikowanym kształcie, wyrobów ceramicznych. W procesie technologicznym spoiwa spełniają trzy bardzo ważne funkcje: (1) nadają wystarczającą wytrzymałość mechaniczną po formowaniu przez zapewnienie odpowiedniego wiązania pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego; (2) ułatwiają zawieszenie w gęstwie ‘grubych’ cząstek ceramicznych przez zwiększenie lepkości fazy ciekłej; (3) chronią przed flokulacją masy powodowaną przez elektrolity; dzieje się tak na skutek adsorpcji spoiwa, które jest koloidem liofilowym, na powierzchni cząstek liofobowych, co zwiększa siłę odpychania wynikającą z istnienia podwójnych warstw elektrycznych. Poza tym dobrze dobrane spoiwo przy możliwie małej zawartości musi nadawać wytrzymałość półfabrykatom ceramicznym, zapewniać dobrą zdolność formierczą, dobrze mieszać się z zestawem ceramicznym, być łatwe do usunięcia w procesie wypalania wyrobu, a także nie powinno się utleniać, zmieniać składu w trakcie przygotowania masy czy ulegać starzeniu podczas przechowywania. Do najczęściej stosowanych spoiw należą: (1) poli(alkohol winylowy) rozpuszczony w wodzie lub mieszaninie wody i etanolu; (2) metyloceluloza, etyloceluloza, karboksymetyloceluloza itp. rozpuszczone w wodzie; (3) rozcieńczalne wodą kopolimery akrylowe i kopolimery octanu winylu (grupa spoiw znajdujących coraz większe zastosowanie w technologiach ceramicznych) [13]; (4) butyral poliwinylowy rozpuszczalny w wielu rozpuszczalnikach organicznych, np. toluenie, etanolu, trójchloroetanie, trójchloroetylenie itp.; (5) polimetakrylan n-butylowy rozpuszczalny w ksylenie lub acetonie.

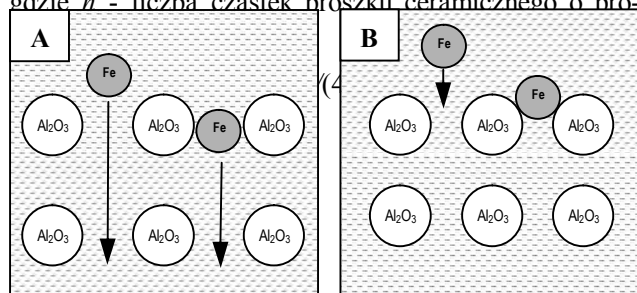
PROJEKTOWANIE SKŁADU CERAMICZNYCH MAS LEJNYCH PRZEZNACZONYCH DO OTRZYMYWANIA GRADIENTOWYCH KOMPOZYTÓW CERAMIKA-METAL

Otrzymywanie gradientowych kompozytów ceramika-metal z wykorzystaniem ceramicznych mas lejnych możliwe jest tylko wówczas, gdy stężenie fazy stałej oraz rozmiar cząstek proszku ceramicznego i proszku metalicznego jest odpowiednio dobrana. Aby nastąpiła sedimentacja cząstek o wyższej gęstości, średnia odległość między cząstkami proszku ceramicznego o niższej gęstości powinna być większa od średniej średnicy cząstki o większej gęstości (metal). Schematycznie przedstawiono to na rysunku 2.

Odległość pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego w masie lejnjej zależy od stężenia fazy stałej oraz rozmiaru ziaren proszku ceramicznego. Obliczenia wykonano przy założeniu kulistego kształtu cząstek proszku. Jeżeli objętość masy lejnnej oznaczymy przez V , a objętość fazy stałej przez V_s , to wyznaczona z obliczeń średnia odległość pomiędzy cząstkami proszku wynosi

$$d_{sr} = \sqrt[3]{\frac{V}{n}} - 2r \quad (1)$$

gdzie n - liczba cząstek proszku ceramicznego o pro-



Rys. 2. Schemat procesu sedymentacji cząstek Fe: A - rozmiar cząstek Fe jest mniejszy od odległości między cząstkami Al_2O_3 , cząstki Fe opadają; B - rozmiar cząstek Fe jest porównywalny lub większy od odległości między cząstkami Al_2O_3 , cząstki Fe są blokowane przez cząstkę Al_2O_3

Fig. 2. Schematic view of the sedimentation process: A - size of the Fe particle is smaller than the distance between the ceramic particles, Fe particles flow down, B - size of the Fe particle is equal or bigger than the distance between the ceramic particles, Fe particles is trapped by the ceramic particles

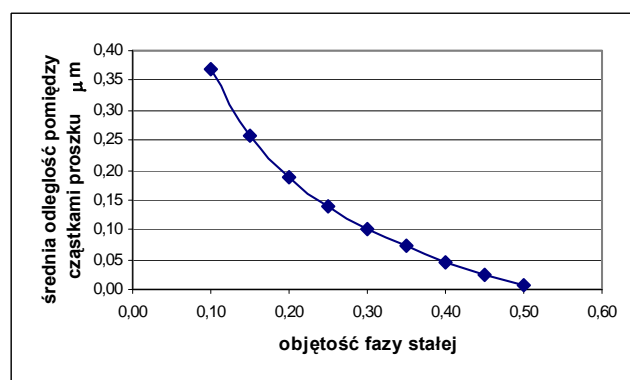
TABELA 1. Zmiany odległości między cząstkami w funkcji objętości fazy stałej dla danej wartości promienia cząstki

TABLE 1. Relationship of distance between particles and volume of solid phase for the fixed size of particles

Mikrometry	Promień cząstki, μm					
	0,25	0,5	1	2	5	10
0,10	0,37	0,74	1,47	2,95	7,36	14,73
0,15	0,26	0,52	1,03	2,07	5,17	10,34
0,20	0,19	0,38	0,76	1,51	3,78	7,56
0,25	0,14	0,28	0,56	1,12	2,79	5,59
0,30	0,10	0,20	0,41	0,82	2,04	4,08
0,35	0,07	0,14	0,29	0,57	1,44	2,87
0,40	0,05	0,09	0,19	0,38	0,94	1,88
0,45	0,03	0,05	0,10	0,21	0,52	1,04
0,50	0,01	0,02	0,03	0,06	0,15	0,31
Odległość między cząstkami w μm						

W przeprowadzonych obliczeniach, które doprowadziły do powyższych wzorów, pominięto zarówno siły kapilarne związane z filtracją cieczy przez porowatą

formę gipsową, ruchy Browna, jak i siły elektrostatyczne związane z istnieniem podwójnych warstw elektrycznych wokół cząstek proszku ceramicznego. Podstawiając wyrażenie (2) do wzoru (1), otrzymamy zależność między średnią odległością pomiędzy cząstkami proszkami ceramicznego a wielkością cząstek i stężeniem fazy stałej. Wartości wyliczone z tej zależności przedstawiono w tabeli 1. Przykładowo zmiany odległości między cząstkami w funkcji objętości fazy stałej dla stałej wartości promienia cząstki zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Zmiany odległości między cząstkami w funkcji objętości fazy stałej dla stałej wartości promienia cząstki ($r = 0,25 \mu m$)

Fig. 3. Relationship of distance between particles and volume of solid phase for the fixed size of particles

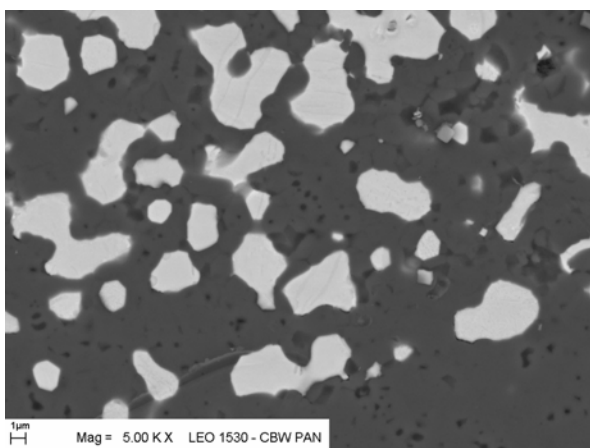
Z przedstawionych obliczeń wynika, że aby uzyskać gradient stężenia metalu poprzez jego sedymentację, konieczne jest dobranie odpowiedniego stężenia fazy stałej ceramicznej masy lejnnej oraz rozmiaru cząstek proszku ceramicznego i metalu. Na skutek procesu sedymentacji możliwe jest osiągnięcie gradientu stężenia cząstek metalu, jeśli ich rozmiar jest mniejszy od odległości pomiędzy cząstkami proszku (rys. 2A). Natomiast gdy rozmiar cząstek metalu jest większy od odległości pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego, sedymentacja cząstek metalu jest praktycznie niemożliwa, cząstki metalu są blokowane pomiędzy cząstkami proszku (rys. 2B). Należy również zaznaczyć, że odległość pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego maleje wraz ze zmniejszeniem rozmiaru cząstek i jest także zależna od udziału objętościowego fazy stałej w ceramicznej masie lejnnej (wzór (1) i (2)). Oznacza to, że gradient stężenia cząstek metalu zależy od rozmiaru cząstek proszku ceramicznego i metalu. W przypadku gdy rozmiar cząstek metalu jest porównywalny lub większy od cząstek proszku ceramicznego, gradient stężenia cząstek metalu musi być wymuszony np. działaniem pola magnetycznego.

Powyższe rozważania, jak projektować kompozyty z gradientem stężenia cząstek metalu, potwierdzają badania eksperymentalne. Wytworzono kompozyty Al_2O_3 -Fe metodą z wykorzystaniem mas lejnnych. Zastosowano tlenek glinu ($\alpha-Al_2O_3$) A16SG firmy Alcoa o

średniej średnicy cząstek $0,5 \mu\text{m}$ i o gęstości $3,926 \text{ g/cm}^3$ oraz proszek żelaza firmy BASF GmbH Germany o średnicy cząstek równej $4 \mu\text{m}$ i gęstości $7,81 \text{ g/cm}^3$. Dodatkowymi składnikami masy leejnej były upłynniające, środki powierzchniowo czynne oraz spoiwa. Jako spoiwo zastosowany był poli(alkohol winylowy) w układzie z poliakrylanem amonowym. Spoiwo było wprowadzane

w postaci 10% roztworu wodnego. Jako rozpuszczalnik zastosowano wodę destylowaną. Składniki masy mieszano przez $0,5 \text{ h}$, a następnie dodawano proszków tlenku glinu i żelaza. Masa była jeszcze mieszana przez 1 h , a potem wylewano ją do porowatej formy o wymiarach $70 \times 100 \times 8 \text{ mm}$. Kształtkę wyjmowano z formy i po wysuszeniu spiekano wstępnie w piecu rurowym w temperaturze 1200°C w atmosferze ochronnej azotu. Spiekanie zasadnicze wykonano w piecu komorowym w próżni (10^{-4} MPa) w temperaturze 1470°C w czasie 1 godziny .

W przypadku mas leejnych o stężeniu tlenku glinu powyżej 40% obj. nie obserwowano gradientu stężenia cząstek żelaza na wysokości kształtki otrzymanej metodą odlewania w formie gipsowej. Wynikało to ze zbyt wysokiego stężenia fazy stałej oraz zbyt dużej średnicy cząstki żelaza w stosunku do cząstek proszku tlenku glinu. W wyniku tego odległość pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego była znacznie mniejsza od średnicy cząstki metalu. Niemożliwa więc była wówczas swobodna sedimentacja cząstek żelaza w ceramicznej masie leejnej. Mikrostruktura kompozytu charakteryzowała się jednorodnym rozmieszczeniem cząstek Fe w osnowie ceramicznej (rys. 4).



Rys. 4. Mikrografia skaningowa kompozytu $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}$
Fig. 4. Scanning electron image of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}$ composite

Niewielki gradient stężenia tych cząstek zaobserwowano wówczas, gdy zastosowano odlewanie w obecności silnego magnesu umieszczonego bezpośrednio pod formą gipsową. Pole magnetyczne spowodowało ruch cząstek żelaza w kierunku magnesu. Na wysokości

próbki obserwowano zróżnicowane rozmieszczenie cząstek metalu. Szczegółowa analiza ilościowa wykazała większą koncentrację cząstek Fe w kierunku działania pola magnetycznego, obserwowano także wydłużone cząstki żelaza rozmieszczone zgodnie z działaniem sił pola magnetycznego [14, 15].

PODSUMOWANIE

Przedstawiono sposób projektowania kompozytów ceramika-metal z gradientem stężenia cząstek metalu na wysokości kształtki. Z obliczeń wynika, że aby uzyskać gradient stężenia metalu metodą sedimentacji, konieczne jest dobranie odpowiedniego stężenia fazy stałej w ceramicznej masie leejnej, rozmiaru cząstek proszku ceramicznego oraz metalu. Jedynie cząstki metalu o rozmiarze mniejszym od odległości pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego mogą swobodnie opadać, tworząc gradient. W przypadku gdy rozmiar cząstek metalu jest porównywalny lub większy od odległości pomiędzy cząstkami proszku ceramicznego, sedimentacja cząstek jest praktycznie niemożliwa. Konieczne jest wówczas wymuszenie gradientu poprzez zastosowanie pola magnetycznego. W zależności od natężenia pola i jego jednorodności można uzyskać gradient stężenia cząstek metalu spowodowany „rozepchnięciem” cząstek proszku ceramicznego lub przyspieszoną sedimentacją aglomeratów proszku ceramicznego i metalu. Użycie pola magnetycznego pozwala również na uzyskanie materiału gradientowego ze względu na rozmieszczenie cząstek metalu wzdłuż linii pola magnetycznego.

Metoda wykorzystująca masy leejne oraz jej połączenie z polem magnetycznym stwarza możliwość opracowania nowej metody otrzymywania materiałów gradientowych. Prace w tym zakresie są obecnie prowadzone na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Wydziale Chemicznym PW.

Prace zrealizowano w ramach projektu zamawianego PBZ-KBN 100/T08/2003 finansowanego ze środków Komitetu Badań Naukowych.

LITERATURA

- [1] Wachtman J.B., Mechanical Properties of Ceramics, John Wiley and Sons, New York 1996.
- [2] Shackelford J.F., Introduction to Materials Science for Engineers, Fourth edition, Prentice-Hall Inc. 1996.
- [3] Boczkowska A., Kapuściński J., Puciłowski K., Wojciechowski S., Kompozyty, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej Warszawa 2000.
- [4] Pampuch R., Budowa i właściwości materiałów ceramicznych, Wydawnictwo AGH, Kraków 1995.
- [5] Sbaizero O., Pezzoti G., Acta Mater. 2000, 48, 985-992.
- [6] Xudong Su, Yeomans J., J. Mat. Sci. 1996, 31, 875-880.

- [7] Sigl L.S., Mataga P.A., Dalgleish B.J., McMeeking R.M., Evans A.G., *Acta Metall.* 1989, 36, 1847-1857.
- [8] Kawasaki A., Watanabe R., *Ceram. Inter.* 1997, 23, 73.
- [9] Konopka K., Oziębło A., *Mater. Characterization* 2001, 46, 125.
- [10] Konopka K., Matysiak H., Olszyna A., *Proc. Sixth International Conference Stereology and Image Analysis in Materials Science, STERMAT, Kraków, 20-23 września 2000.*
- [11] Szafran M., Laskowska J., Jaegermann Z., *Bioceramiczne materiały porowate, Cz. 1. Sposób otrzymywania materiałów z udziałem spienionych tworzyw sztucznych, Szkło i Ceramika* 2000, 51, 1, 9.
- [12] Szafran M., Laskowska J., Jaegermann Z., *Bioceramiczne materiały porowate, Cz. 2. Poli(alkohol winylowy) a właściwości biomateriałów otrzymywanych z udziałem spienionych tworzyw sztucznych, Szkło i Ceramika* 2000, 51, 2, 27.
- [13] Szafran M., Rokicki G., *Effect of acrylic-styrene copolymer chemical structure on the properties of ceramic tapes obtained by tape casting, J. Am. Ceram. Soc.* 2001, 84, 1231-35.
- [14] Oziębło A., Wejrzanowski T., Konopka K., Szafran M., Kurzydłowski K.J., *Materiały konferencyjne FGM 2004, Leuven, Belgia* 2004.
- [15] Oziębło A., Konopka K., Bobryk E., Kurzydłowski K.J., Szafran M., *Solid State Phenom.* 2005, 101-102, 143-146.

Recenzent
Jan Leżański