



Marcin Rozmus^{1*}, Włodimir Mituszew², Lucyna Jaworska³, Natalia Rylko⁴

^{1,3} Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania, ul. Wrocławska 37a, 30-011 Kraków, Poland

^{2,4} Akademia Pedagogiczna, Instytut Techniki, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków, Poland

* Corresponding author. E-mail: marcin.rozmus@ios.krakow.pl

Otrzymano (Received) 10.02.2008

PROJEKTOWANIE TWORZYW Z GRADIENTEM ROZMIESZCZENIA FAZ OTRZYMYWANYCH METODĄ ZAGĘSZCZANIA W ULTRAWIRÓWCE

Kompozyty polikrystalicznego diamentu PCD są okrągłymi dyskami składającymi się z cienkiej warstwy polikrystalicznego diamentu związanego z warstwą podłożową z węglika spiekanego. Dostępne komercyjnie PCD są zazwyczaj wytwarzane przez wysokociśnieniowe spiekanie proszków diamentowych z kobaltową fazą wiążącą. Obecność kobaltu aktywuje proces grafityzacji diamentu. Różnica rozszerzalności temperaturowej warstwy PCD i podłoża z węglika spiekanego może powodować wystąpienie naprężeń szczątkowych i następnie delaminację materiału. Modyfikacja właściwości tego materiału jest możliwa przez zastosowanie odpowiedniego rodzaju materiału fazy wiążącej, na przykład Ti_3SiC_2 , który wykazuje pseudoplastyczne właściwości. Celem badań było wykonanie matematycznych obliczeń rozkładu faz dla materiałów gradientowych diament- Ti_3SiC_2 , które były weryfikowane z rozkładem faz w kompozytach po procesie spiekania techniką HP-HT. W pracy zaproponowano algorytm do opisu sedimentacji grup sferycznych cząstek o różnorodnych rozmiarach i z różnorodnych materiałów. Główne obliczenia dla tego układu i prawdziwych warunków procesu zagęszczania wirówkowego HCP są wykonane za pomocą równania Barnea-Mizrahi. Proces osadzania dla układu diament- Ti_3SiC_2 przeprowadzono w ultrawirówce UP 65M z prędkością obrotową rotora 20 000 obr/min. Rozkład rozmiarów ziaren dla proszków diamentu i Ti_3SiC_2 zmierzono z użyciem aparatury Shimadzu. Rozkład twardości dla kompozytu diamentowego z gradientem składu fazowego zmierzono i porównano do koncentracji diamentu i węglika W, zależnej od czasu opadania proszków i diamentu i węglika oraz od odległości.

Słowa kluczowe: kompozyt diament- Ti_3SiC_2 , funkcjonalne materiały gradientowe, proces zagęszczania wirówkowego, HCP, algorytm do opisu procesu sedimentacji

TAILORING OF MATERIALS WITH GRADIENT OF PHASES DISTRIBUTION OBTAINING BY CENTRIFUGAL COMPACTION PROCESS

The polycrystalline diamond PCD compacts are a round disks composite of a thin layer of sintered polycrystalline diamond bonded to a cemented tungsten carbide substrate. Commercially available PCD are usually made by high pressure sintering diamond powders with the cobalt bonding phase. The existence of cobalt promotes the graphitisation process of diamond. The differential thermal expansion of PCD layer and tungsten carbide substrate may result in residual stresses and next, delamination of material. Modification properties of these materials is possible using suitable kind of the bonding phase material, for example the ceramics Ti_3SiC_2 material, which is exhibiting pseudoplastic behaviour. The aim of the research was execution of mathematical calculations of the phases distribution for the phase graded diamond - Ti_3SiC_2 compacts which were verified with phases distribution in compacts after the high pressure - high temperature sintering process. An algorithm to describe sedimentation of the group of spherical particles of different sizes and different materials was proposed. Main calculations for this system and for real conditions of the high-speed centrifugal compaction process are made using the Barnea-Mizrahi equation. Deposition process for diamond - Ti_3SiC_2 was carried out using the ultra centrifuge UP 65M with rotational speed of 20 000 rpm. Particle size distribution for the diamond and Ti_3SiC_2 powders were measured using Shimadzu apparatus. Hardness distribution for diamonds composite with phase composition gradient was measured and compared to the concentration of diamond and carbide W for diamond and Ti_3SiC_2 powders dependence on distance.

Keywords: diamond- Ti_3SiC_2 composite, functionally graded materials, high speed centrifugal compaction process, HCP, algorithm to describe sedimentation process

WSTĘP

W wyniku wysokociśnieniowej syntezy diamentu, począwszy od połowy lat pięćdziesiątych XX wieku, wytwarza się proszki diamentu głównie w postaci mi-

krometrycznych i submikrometrycznych cząstek. Produkcja dużych monokryształów diamentu zapoczątkowana w latach dziewięćdziesiątych XX wieku jest bar-

dzo kosztowna, stąd najprostszą drogą do zastosowania diamentu w technice jest jego spiekanie. Od 1972 roku dzięki osiągnięciom Wentorfa wytwarzane są spieki diamentowe nazywane w literaturze polikrystalicznym diamentem (PCD, ang. Polycrystalline Diamond) [1]. Spiekane są z mikroproszków diamentu syntetycznego w obecności kobaltu, pełniącego funkcję fazy wiążącej, w warunkach wysokich ciśnień. Kobalt jako faza wiążąca, wprowadzany w ilości do 8% obj., zapewnia spiekom lepszą ciągliwość, przewodność elektryczną (potrzebną do kształtowania materiałów metodą obróbki elektroerozyjnej) i obniża parametry procesu spiekania, pełniąc rolę katalizatora tego procesu. W ostatnim dziesięcioleciu kobalt jest eliminowany z wszelkich materiałów narzędziowych. Przyczyną ograniczania zastosowania kobaltu jest jego szkodliwość dla zdrowia człowieka (wywołuje alergie i niektóre postacie nowotworów), a przede wszystkim niestabilność cen kobaltu. Temperatura pracy ostrza skrawającego sięga 970 K, kobalt jest katalizatorem przemiany alotropowej grafitu w diament i odwrotnie, jego obecność obniża temperaturę tej przemiany. Ostrza ze spieków diamentowych najczęściej pracują w warunkach intensywnego chłodzenia, co z uwagi na szkodliwość dla zdrowia i środowiska człowieka emulsji chłodząco-smarujących oraz ich wysoką cenę stwarza dodatkowe problemy. Pod koniec lat dziewięćdziesiątych pojawiły się pierwsze komercyjne kompozyty diamentowe z ceramiczną fazą wiążącą w postaci SiC. Materiały te otrzymywane są najczęściej metodą spiekania reaktywnego diamentu z Si [2]. Materiały diamentowe z SiC charakteryzują się lepszą odpornością temperaturową w stosunku do materiałów z fazą wiążącą w postaci kobaltu, mniejszą kruchością, większą wytrzymałością na ściskanie. Faza wiążąca z SiC jest chemicznie obojętna, a jej współczynnik rozszerzalności jest zbliżony do współczynnika diamentu. Jednak twardość tych kompozytów jest niższa w porównaniu do PCD z kobaltem. Oprócz małej odporności na kruche pękanie i stosunkowo niskiej temperatury zastosowania polikrystalicznych materiałów diamentowych z kobaltową fazą wiążącą przeznaczonych na ostrza narzędzi skrawających wyłania się jeszcze jedna wada - jest nią brak zwilżalności diamentu przez większość spoiw lutujących. Są to najczęściej płytki dwuwarstwowe, mocowane mechanicznie w standardowych oprawkach lub częściej lutowane do stalowego bądź węglkowego korpusu narzędzia.

Sprasowany proszek diamentowy wraz z fazą wiążącą lub bez nakłada się na podłoże z węgliku spiekanego na osnowie WC, także z kobaltową fazą wiążącą i spieka wysokociśnieniowo. Dzięki dyfuzji kobaltu z podłoża węglkowego następuje połączenie pomiędzy warstwą diamentową a węglkową. Grubość warstwy diamentowej PCD wynosi od 0,5 do 1,5 mm, a podłoża z węgliku spiekanego do 2 mm. Dwuwarstwowe płytki lub wycięte z nich kształtki lutuje się lub mocuje mechanicznie w gniazdach narzędziowych. Warstwa węgli-

kowa umożliwi połączenie ostrza (spoiwem lutującym - lutem) z korpusem narzędzia (np. płytki skrawającej). Temperatura topnienia spoiwa lutującego w przypadku łączenia diamentu nie powinna przekraczać temperatury 973 K ze względu na możliwość zajścia w tej temperaturze przemiany alotropowej diamentu w grafit. Lutowanie narzędzi przeprowadza się za pomocą urządzenia lutującego wyposażonego w generator wysokiej częstotliwości lub za pomocą lasera. Współczesna obróbka skrawaniem wymusza na producentach przygotowanie narzędzi o bardziej skomplikowanym kształcie ostrza i korpusu. Rozwiązanie zagadnienia łączenia ostrza diamentowego z korpusem narzędzia metodą mechaniczną stało się niewystarczające. Bardzo powszechnie stosowany materiał dwuwarstwowy z warstwą PCD i podłożową warstwą ze spiekane go węgliku wolframu ułatwia łączenie z korpusem narzędzia, jednak duże różnice współczynników rozszerzalności liniowej warstwy PCD (w 293 K α wynosi $1,3 \times 10^{-6}/K$, w 973 K - $3,9 \times 10^{-6}/K$) i warstwy węgliku spiekane go (w 293 K α wynosi $4,5 \times 10^{-6}/K$, w 973 K - $5,2 \times 10^{-6}/K$) są przyczyną powstawania naprężeń cieplnych na etapie lutowania, obróbki ostrza i procesu skrawania, które powodują rozwarstwianie się materiału i duże straty dochodzące nawet do 40% ogólnej ilości materiałów warstwowych [3]. W celu lutowania materiałów PCD stosuje się bardzo kosztowne urządzenia próżniowe z laserem i specjalne spoiwa lutujące na bazie srebra zawierające ind i tytan, które gwarantują prawidłowe, trwałe i wytrzymałe połączenie diamentu z korpusem narzędzia [3].

W ostatnich latach w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie wspólnie z Katedrą Ceramiki Specjalnej AGH opracowano nową fazę wiążącą dla proszków diamentowych w postaci węgliku tytanowo-krzemowego, który posiada właściwości cechujące tworzywa ceramiczne, ale także jest, podobnie jak metale, materiałem plastycznym.

Kompozyt diamentowy z ceramiczną fazą wiążącą w postaci Ti_3SiC_2 charakteryzuje się podwyższoną odpornością temperaturową w stosunku do PCD z kobaltem, lepszymi właściwościami wytrzymałościowymi. Ogólna koncepcja diamentowego materiału z gradientem rozkładu faz polega na otrzymaniu materiału, w którym Ti_3SiC_2 będzie pełniło podwójną rolę, tj. materiału fazy wiążącej i materiału podłożowego, eliminującego problem rozwarstwień i zapewniającego połączenie ze stalą lub węglikiem spiekany m korpusu narzędzia. Informacje literaturowe, ale także własne badania przeprowadzone z Instytutem Odlewnictwa potwierdziły dobrą zwilżalność związku Ti_3SiC_2 przez spoiwa przeznaczone do lutowania węglików spiekanych na osnowie miedzi [4, 5]. Materiały z gradientem rozmieszczenia faz otrzymywane są metodą zagęszczania w wirówce szybkoobrotowej (HCP, ang. High Speed Centrifugal Compaction Process). Metoda ta okazała

się bardzo skuteczna w przypadku otrzymywania zarówno cermetali, jak i PCD [6-8].

Kolejnym etapem badań jest modelowanie procesu opadania cząstek i próba zaprojektowania gradientu rozmieszczenia faz tak, aby uzyskany wirówkowo gradient odpowiadał wymogom technologicznym ostrza narzędzia skrawającego. Zaprojektowany materiał powinien charakteryzować się wysoką zawartością diamentu w warstwie roboczej, ale nie mniej niż 10% fazy wiążącej, 100% zawartością Ti_3SiC_2 w warstwie podłożowej i stopniowo „płynnie” zmieniającym się rozmieszczeniem faz pomiędzy warstwą roboczą - diamentową a warstwą podłoża z Ti_3SiC_2 . Wysokość próbki przed procesem spiekania ciśnieniowego nie może przekraczać 5,5 mm ze względu na ograniczenia aparatury do spiekania wysokociśnieniowego. Przeprowadzone badania wskazują, że rozkład faz w gradientowym materiale diamentowym może być bardzo zróżnicowany i ściśle zależy od parametrów zagęszczania wirówkowego, szybkości, czasu wirowania i wielkości cząstek diamentu i Ti_3SiC_2 . Na przykład, w wyniku przeprowadzonych prób zagęszczania uzyskano 100% zawartość diamentu w warstwie powierzchniowej, przy dużym gradiencie twardości materiału okazało się, że jego obróbka, a nawet przygotowanie „zglądów” do badań mikroskopowych jest niemożliwe.

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Węglik Ti_3SiC_2 otrzymano metodą syntezy bezpośredniej węgla, krzemu i tytanu w warunkach SHS (samorozwijająca się synteza wysokotemperaturowa) w Katedrze Ceramiki Specjalnej WIMiC AGH.

Mieszanki proszkowe diamentu (w gatunku MDA36, prod. Element 6) z 25% obj. Ti_3SiC_2 o wielkości cząstek wynoszącej $3\pm 6 \mu m$ ujednorodniono w dezintegratorze ultradźwiękowym oraz mieszano mechanicznie w urządzeniu Turbula przez okres jednej godziny, w obecności bezwodnego alkoholu etylowego. Po wysuszeniu proszki prasowano bez środków poślizgowych, stosując nacisk prasy 200 MPa. Kształtki umieszczano w grzejniku grafitowym, a następnie we wkładzie do spiekania wysokociśnieniowego.

Wysokociśnieniowe spiekanie mieszanek prowadzone było w prasie DOO - 4 o nacisku do 2500 kN, wyposażonej w komorę wysokiego ciśnienia typu Bridgmana. Parametrami decydującymi o właściwościach wytwarzanych kompozytów są: temperatura, ciśnienie i czas spiekania. Optymalne parametry spiekania wyznacza się poprzez korelowanie ich z właściwościami fizykochemicznymi otrzymanych kompozytów. Maksymalna średnica spiekanych w tym urządzeniu materiałów wynosi 15 mm.

Twardość kompozytów wyznaczono na zglądach metalograficznych metodą Vickersa przy obciążeniu 294,2 N za pomocą twardościomierza Frankoskop i cyfrowego miernika twardości FM-7 firmy Future

Tech. Corp. Do badań tych przygotowano zglądy metalograficzne z wykorzystaniem urządzeń i środków polerskich firmy Struers.

Pojedyncza ciężka cząstka kulista opada w lepkiej cieczy pod wpływem pola grawitacji odpowiednio do szybkości opadania wg Stokesa [9]:

$$U_s = \frac{d^2(\rho - \rho_c)}{18\eta} g_0 \quad (1)$$

gdzie d oznacza średnicę cząstki, ρ i ρ_c - gęstość cząstek i cieczy, η - dynamiczną lepkość cieczy, g_0 - przyspieszenie grawitacji. Równanie (1) jest uzasadnione dla laminarnego przepływu, kiedy liczba Reynoldsa

$Re = \frac{U_s \rho d}{\eta}$ spełnia nierówność $10^{-4} < Re < 2$ [9].

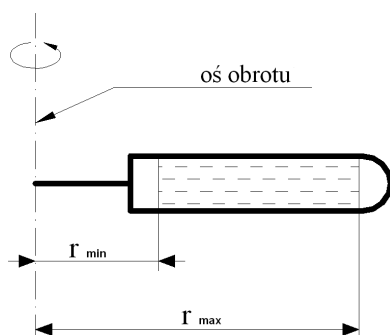
Późniejsze ograniczenia utrzymują się dla powolnego opadania cząstek.

Jones i Kutteh [10] stosownie do symulacji Stokesa porównali hydrodynamiczne oddziaływania pomiędzy koloidalnymi cząstkami w nieograniczonej cieczy oraz blisko ściany. Wyniki wykazały, że cząstki w nieograniczonym płynie znajdują się w wysokim stopniu symetrii konfiguracji, co się zmienia w przypadku obecności ścian. Podobna metoda opierająca się na mechanice statystycznej była zastosowana przez Ekel-Jeżewską [11] do badań losowych chmur cząstek. Grawitacyjne opadanie małych cząstek opisano numerycznie w pracy Bosse [12]. Wpływ ścianek na fluktuacje szybkości były prezentowane przez Muchę [13]. Ten model wskazuje na istnienie krytycznego uwarstwienia, powyżej którego szybkość fluktuacji zmienia się znacząco. Symulacje Lattice-Boltzmana były stosowane do monodispersyjnych i polidispersyjnych zawiesin [14]. Zweryfikowano, że fluktuacje szybkości opadania cząstek były tłumione przez tarcie występujące na ściankach. Kynch opracował kinematyczny model sedymentacji stosowany do wysokiej koncentracji zawiesin [15]. Istnieją wnikliwe opracowania zawierające przegląd ostatnich prac eksperymentalnych i teoretycznych dotyczących zagadnień osadzania wirówkowego i sedymentacji [16]. Wspólnym wnioskiem z powyższych przeglądów jest, że dobrze opisane są zagadnienia dotyczące badań sedymentacji grawitacyjnej. Kwestia sedymentacji odśrodkowej, kiedy zewnętrzne siły działające na zawiesinę zasadniczo przekraczają grawitację i zmieniają się w czasie, nie była badana teoretycznie i eksperymentalnie zbyt wnikliwie. W prezentowanych badaniach skonstruowano matematyczny model sedymentacji rozcieńczonej zawiesiny, stosując ten model do cząstek diamentu i Ti_3SiC_2 i porównano wyniki teoretyczne z eksperymentalnymi. Biorąc do obliczenia hydrodynamiczne oddziaływania cząstek i wpływ ścian, istnieje możliwość zastosowania poprawek do równania Stokesa (1). W obliczeniach zastosowano korekcję Barnea-Mizrahi

$$U = U_s \frac{(1-\phi)^2}{(1+\phi^{1/3}) \exp\left[\frac{5\phi}{3(1-\phi)}\right]} \quad (2)$$

gdzie ϕ oznacza koncentrację.

W badaniach eksperymentalnych oraz w opisie matematycznym zastosowano koncentrację $\phi = 0,1$, dla wyższych koncentracji sedimentacja jest opisywana przez nieliniowe równania paraboliczne. Proces HCP wymaga weryfikacji teoretycznych wyników, opartych na zależnościach (1)-(2), przyspieszenie grawitacyjne g_0 jest zastąpione przez przyspieszenie odśrodkowe g , które przekracza g_0 przynajmniej pięć razy. Poza tym przyspieszenie odśrodkowe zależy od czasu t . Geometryczny schemat układu zastosowanego do wirowania został przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat geometrii rotora

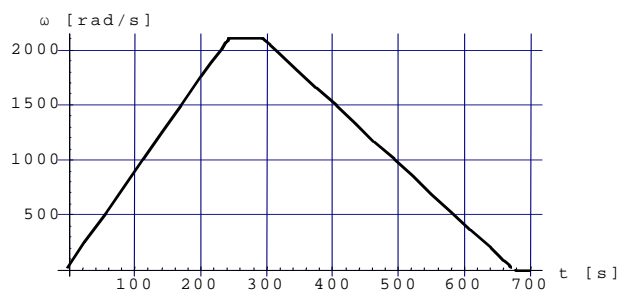
Fig. 1. Scheme of the rotor geometric

Układ składa się z naczynia w kształcie próbki poruszającej się po okręgu wokół osi rotora. Odległość między środkiem obrotu i czołem zawiesziny w próbce jest oznaczona przez r_{min} i wynosi dla stosowanego urządzenia 5,5 cm. Odległość do dna próbki r_{max} jest równa 12,88 cm. Wysokość naczynia wynosi 7,38 cm. Oś obrotów jest prostopadła do osi próbki. Sferyczne cząstki są jednocie rozproszone w całej objętości naczynia, w związku z tym przy początkowym czasie $t = 0$ zawieszina jest jednorodna. Na początku eksperymentu siły grawitacji działają na cząstki, ale zasadniczo nie zmieniają ich położenia. W czasie zwiększania obrotów siły odśrodkowe przekraczają siły grawitacji około pięć razy.

Kolejno dla zastosowanych równań (1), (2) dla procesu HCP wykonaliśmy modyfikację. Stała grawitacji g_0 została zastąpiona przez funkcję $g(t) = r(t)\omega^2(t)$, gdzie $r(t)$ jest odległością, którą cząstka przebywa od góry naczynia ($r_{min} = 5,5$ cm) do jego dna, dla czasu $t\alpha(t)$ jest prędkością kątową. Typowy wykres $\alpha(t)$ przedstawiono na rysunku 2.

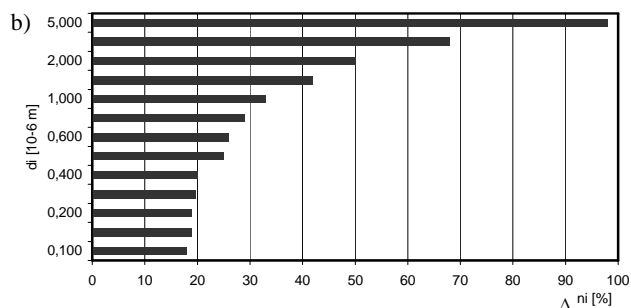
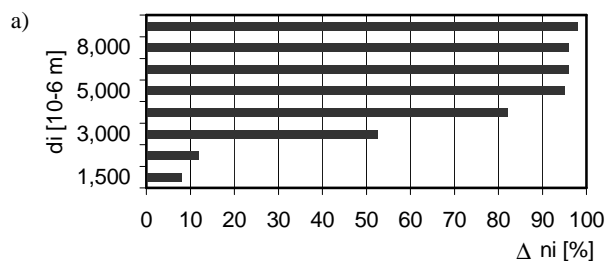
Rozkład cząstek ($d_i, \Delta n_i$) był mierzony przy użyciu aparatu Shimadzu; rozkłady przedstawiono na rysunku 3. Na rysunku 4 pokazano zależność koncentracji W (masowy udział cząstek diamentu w fazie stałej) od czasu

wirowania t dla proszku diamentu dla procesu wirowania opisanego na rysunku 1.



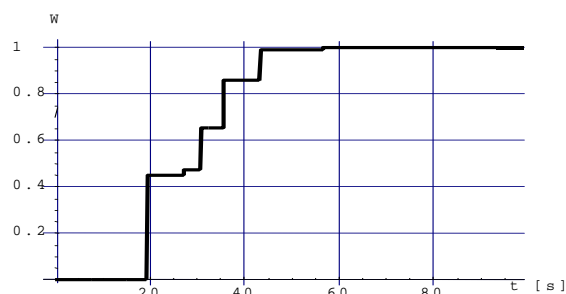
Rys. 2. Zależność prędkości kątowej ω od czasu wirowania t . Czas przyspieszania - 247 s, czas stałej maksymalnej prędkości kątowej - 50 s, czas hamowania - 380 s, stała maksymalna prędkość obrotowa wynosi 20 000 obr/min

Fig. 2. Dependence of the angular velocity ω on the time t . Time of acceleration $t_1 = 247$ s, time of constant angular velocity $t_2 = 50$ s, time of braking $t_3 = 380$ s, constant angular velocity 20 000 rpm



Rys. 3. Rozkład wielkości cząstek mierzony z użyciem aparatu Shimadzu dla: a) diamentu i b) Ti_3SiC_2

Fig. 3. Distribution of the particles ($d_i, \Delta n_i$) measured by Shimadzu's apparatus for diamond (a) and Ti_3SiC_2 (b)



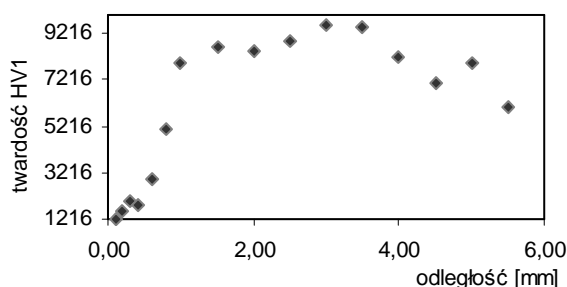
Rys. 4. Zależność koncentracji W proszku diamentu w zależności od czasu wirowania t dla przebiegu wirowania opisanego na rysunku 1

Fig. 4. Dependence of the concentration W on t for diamond powder for the regime of rotation described in Figure 1

WYNIKI BADAŃ I ICH OMÓWIENIE

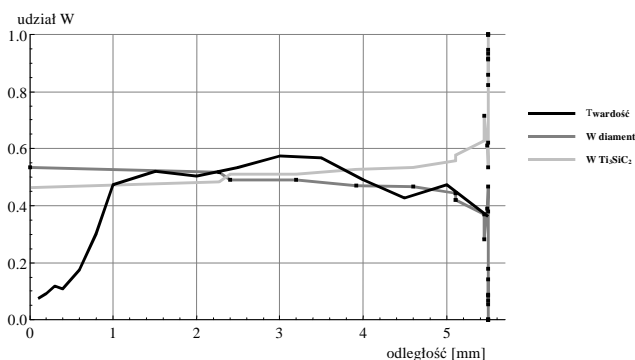
Zaproponowana metoda może być rozwinięta dla cząstek z różnorodnych materiałów. Badania przeprowadzono dla diamentu ($\rho = 3,515 \text{ g/cm}^3$) i Ti_3SiC_2 ($\rho = 4,53 \text{ g/cm}^3$). Wykorzystując znane gęstości opadających cząstek, ich udział masowy, wyprowadzono wzór umożliwiający przejście od zależności koncentracji w funkcji czasu do zależności koncentracji opadających cząstek konkretnego tworzywa diamentu i Ti_3SiC_2 dla określonych wielkości cząstek przedstawionych w funkcji odległości.

Na rysunku 5 pokazano zmierzony gradient twardości w funkcji odległości od „góry” próbki do „spodu” dla otrzymanego kompozytu, krzywa ta została zestawiona na rysunku 6 wraz z krzywymi zależności koncentracji diamentu i węgla tytanowo-krzemowego w funkcji odległości.



Rys. 5. Rozkład twardości w diamentowym kompozycie z gradientem składu fazowego

Fig. 5. Hardness distribution for diamonds composite with phase composition gradient



Rys. 6. Zestawienie rozkładów twardości i zależności koncentracji w funkcji odległości dla diamentu i Ti_3SiC_2

Fig. 6. Comparison of hardness distribution in composite to the dependence of diamond and Ti_3SiC_2 powders concentration W on distance

Zaproponowany opis matematyczny wykazuje dużą zgodność pomiędzy koncentracją opadających cząstek a krzywą rozkładu twardości kompozytu w funkcji odległości. Twardość polikrystalicznego diamentu HV1 wynosi około 6000÷9000, natomiast twardość węgla tytanowo-krzemowego w zależności od metody otrzymywania wynosi do 2800. Z rysunku 6 wynika, że

w otrzymanym materiale, w odległości od powierzchni próbki od 1 do 2 mm, materiał charakteryzował się wysokimi wartościami twardości, od 2 mm do końca procesu osadzania maleje udział fazy diamentowej, a rośnie udział Ti_3SiC_2 , co charakteryzuje się zmniejszeniem twardości. Pozostaje niezgodność od początku procesu do 1 mm od powierzchni próbki. Wynika ona z przygotowania próbki do badań, zgląd przygotowano z próbki przeciętej na pół, bez jej wcześniejszego szlifowania, aby nie wpływać na pomiary rozkładu twardości w funkcji odległości. Materiał był spiekany bezpośrednio w tulejce grafitowej pełniącej rolę grzejnika i w warstwie tej zaznacza się wpływ grafitu na materiał spiekany.

WNIOSKI

Przedstawiono matematyczny model tworzenia materiałów z gradientem rozmieszczenia faz, opierający się na modyfikacji równania Stokesa z poprawką Barnea-Mizrahi. Zaproponowano algorytm do opisu sedimentacji grup sferycznych cząstek o różnorodnych rozmiarach i z różnorodnych materiałów w funkcji czasu i odległości. Wyniki obliczeń zostały zastosowane do zawiesin proszków diamentu i Ti_3SiC_2 w procesie zagęszczania. Uzyskano dużą zgodność pomiędzy modelem matematycznym a wynikami eksperymentalnymi. W przyszłości symulacje zostaną zastosowane do stworzenia materiału (PCD) według kryteriów technologicznych, które zostały przedstawione we wstępie.

Podziękowania

Autorzy składają podziękowania Prof. drowi hab. inż. Ludosławowi Stobierskiemu za przygotowanie proszków Ti_3SiC_2 .

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego własnego N508 011 31/0931 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] Wentorf R.H., Rocco W.A., Patent SAP 7315038, 1973.
- [2] Osipov O.S., Diegues Skury A.L., Bobrovnichii G.S., Influence of high pressure on the microhardness and wear resistance of diamond powder and silicon carbide-based composites, *Materials Research* 2004, 7, 2, 335-337.
- [3] Trenker A., Seidemann H., High vacuum brazing of diamond tools, *Industrial Diamond Review* 2002, 1, 49-51.
- [4] Olesińska W. i in., Reactive metallic layers produced on AlN , Si_3N_4 and SiC ceramics, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 2004, 15, 813-817.
- [5] Jaworska L., Rozmus M., Królicka B., Zębała W., Sobczak N., Diamentowy kompozyt o mikrostrukturze gradientowej, *Prace IZTW, Seria: Sprawozdania*, nr 8786, Kraków 2007.
- [6] Jaworska L., Smuk B., Królicka D., Wszolek J., Tworzywa cermetalowe przeznaczone na ostrza narzędzi skrawających, *Kompozyty (Composites)* 2005, 5, 3, 21-25.

- [7] Rozmus M., Jaworska L., Królicka B., Twardowska A., Functionally graded materials prepared using PM methods, *Mat. Konf. Engineering and Education, Białka Tatrzańska* 2006, 195-200.
- [8] Mityushev V., Jaworska L., Rozmus M., Królicka B., Compaction of the diamond-Ti₃SiC₂ graded material by the high-speed centrifugal compaction process, *Archives of Materials Science and Engineering* 2007, 28, 11, 677-682.
- [9] Jaworska L., Migdał W., Klasyfikacja mikroziarn diamentowych o wielkości 3-28 mikrometrów, *Mat. VI Konferencji Nauk.-Techn. nt. Obróbka Ściera, JOTES, Łódź* 1991.
- [10] Jones R.B., Kutteh R., Sedimentation of colloidal particles near a wall: Stokesian dynamic simulations, *Phys. Chem. Chem. Phys.* 1999, 1, 2121-2139.
- [11] Ekel-Jeżewska M.L., Metzger B., Guazzelli E., Spherical cloud of point particles falling in a viscous fluid, *Phys. Fluids*, 2006, 18, 038104.
- [12] Bosse T., Kleiser L., Meiburg E., Small particles in homogeneous turbulence: Settling velocity enhancement by two-way coupling, *Phys. Fluids* 2006, 18, 027102.
- [13] Mucha P.J., Tee S.Y., Weitz D.A., Shraiman B.I., Brenner M.P., A model for velocity fluctuations in sedimentation, *J. Fluid Mech.* 2004, 501, 71-104.
- [14] Nguyen N.Q., Ladd A.J.C., Sedimentation of hard-sphere suspensions at low Reynolds number, *J. Fluid Mech.* 2005, 525, 73-104.
- [15] Bustos M.C., Burger R., Concha F., Tory E.M., *Sedimentation and Thickening*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht 1999.
- [16] Ramaswamy S., Issues in the statistical mechanics of steady sedimentation, *Advances in Physics* 2001, 50, 341.