

Krzysztof Naplocha*, Kazimierz Granat

Politechnika Wroclawska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji, ul. Lukasiewicza 5, 50-371 Wrocław, Poland

* Corresponding author. E-mail: krzysztof.naplocha@pwr.wroc.pl

Otrzymano (Received) 11.01.2010

MATERIAŁY KOMPOZYTOWE NA OSNOWIE STOPU ALUMINIUM UMACNIANE KSZTAŁTKAMI $Al_2O_3/Ti/C$

Opirając się na wysokotemperaturowej syntezie SHS, wytwarzano porowate kształtki ceramiczne do umacniania kompozytów na osnowie stopu aluminium. Wytworzone z mieszaniny włókien tlenku aluminium Saffil, proszku Ti oraz grafitu płatkowego prostopadłościennie próbki umieszczano w komorze mikrofalowej. Magnetron zasilano stałą mocą 540 W, inicjując i podtrzymując reakcję w strumieniu przepływającego gazu CO_2 . Włókna nadawały kształtce początkową wytrzymałość, natomiast proszki utworzyły twarde związki zawierające Ti. Rejestrowano zmiany temperatury oraz prędkość propagacji syntezy. Kształt krzywych temperatur dla wszystkich próbek był podobny. Największą temperaturę syntezy $1860^\circ C$ uzyskiwały próbki zawierające 10% Al_2O_3 , 10% Ti i 5% grafitu. Synteza niektórych próbek przebiegała z powtórny wzrostem temperatury świadczącym o podtrzymywaniu reakcji przez mikrofa. Przeprowadzone obserwacje mikroskopowe wykazały dostateczną jednorodność struktury, choć w niektórych przypadkach spotykano nieprzereagowane do końca cząstki proszku Ti. Analiza chemiczna EDS produktów reakcji potwierdziła występowanie tlenków oraz złożonych związków zawierających Al i Ti. Niezależnie od zawartości grafitu związki te przyjmowały formę pofalowanych pasm wokół litych bądź pustych obszarów. W zależności od dostępu do CO_2 reakcja mogła być spowalniana, skutkując bardziej zwartymi wydzieleniami Ti. Wytworzone w wyniku syntezy spaleniowej związki tytanu po nasyceniu ciekłym metalem dobrze łączyły się z osnową. Można przypuszczać, że zachodziła reakcja redox i na powierzchni wydzielen powstawały tlenki aluminium oraz związki międzymetaliczne z układu Al-Ti. Kształtki o jednorodnej strukturze nasycano stopem AlSi7Mg metodą prasowania w stanie ciekłym. Przeprowadzone badania wykazały korzystny wpływ umocnienia na rozszerzalność cieplną oraz twardość HB.

Słowa kluczowe: SHS, kształtka, Al_2O_3 -Ti, kompozyt

COMPOSITE MATERIALS BASED ON ALUMINIUM ALLOY REINFORCED WITH $Al_2O_3/Ti/C$ PREFORM

On the base of high temperature synthesis SHS porous ceramic preforms for aluminum matrix composite reinforcing were produced. From mixture of Saffil alumina fibres, Ti powder and flaky graphite block samples were formed, dried and next placed in microwave chamber. Magnetron was supplied with constant power of 540 W to ignite and support reaction in flowing stream of CO_2 gas. Fibres create initial skeleton build and preform strength, whereas Ti powder processed to hard titanium compounds. Temperature changes and velocity of synthesis front propagation were recorded. Temperature profiles were similar for all samples. The highest synthesis temperature of $1860^\circ C$ was detected for samples containing 10% Al_2O_3 , 10% Ti and 5% of graphite, all the percentages v/v. Synthesis of some samples proceeded with second temperature increase as a result microwave radiation support. Microscopic observation showed sufficient structure homogeneity, though in some cases unprocessed Ti particles occurred. Chemical analyze EDS of reaction products revealed presence of oxides and complex Al and Ti compounds. Independently of graphite content these compounds formed folded strips around solid or empty volume. Depends on CO_2 availability, reaction could be slowed down resulting in more compacted Ti compounds. Created as a result of combustion synthesis Ti compound after infiltration with liquid metal properly bounded with the matrix. It could be assumed that redox reaction proceeded and on surface of Ti compound alumina and Al-Ti compounds were created. The preforms with homogeneous structure were infiltrated with AlSi7Mg by squeeze casting method. Performed tests showed that reinforcement improved hardness HB and reduced thermal expansion.

Keywords: SHS, perform, Al_2O_3 -Ti, composite

WPROWADZENIE

Wysokotemperaturowa synteza SHS aktywowana mikrofalami, którą zdefiniowano w pracy [1] jako MACS (microwave activated combustion synthesis), umożliwia wytworzenie porowatych kształtek do umacniania ma-

teriałów kompozytowych. Nagrzewanie mikrofalowe usprawnia proces oraz oddziałuje na strukturę i stopień przereagowania mieszaniny wyjściowej substratów. Korzyści wynikające z zastosowania mikrofal czy plazmy zo-

stały już wielokrotnie potwierdzone [2, 3]. Padające na nagrzewany materiał promieniowanie mikrofalowe indukuje wewnętrzne pole elektromagnetyczne. Gęstość energii zaabsorbowanej w jednostce objętości można wyrazić sumą składowej pola elektrycznego P_e oraz magnetycznego P_h . W pewnym stopniu mówi ona, jaka część energii zostanie zaabsorbowana i efektywnie wykorzystana na nagrzanie próbki. Ilość energii pochłoniętej zaabsorbowanej przez materiał (W/m^3) w jednostce czasu można wyznaczyć na podstawie wzoru [4]:

$$P = P_e + P_h = 2\pi f \left(\epsilon_0 \cdot \epsilon'' |E|^2 + \mu_0 \cdot \mu'' |H|^2 \right) \quad (1)$$

gdzie: f - częstotliwość promieniowania mikrofalowego, zwykle 2,4 GHz, ϵ_0 - przenikalność elektryczna próżni ($8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m), μ_0 - przenikalność magnetyczna próżni ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), ϵ'' - współczynnik stratności, μ'' - składowa zespolona przenikalności magnetycznej, stratność magnetyczna, $|E|$ - amplituda natężenia wewnętrznego pola elektrycznego, V/m, $|H|$ - amplituda natężenia wewnętrznego pola magnetycznego.

W przypadku materiałów dielektrycznych przenikające mikrofałe generują głównie wewnętrzne pole elektryczne. Wprawia ono w drgania elektrony lub jony oraz w rotacje indukowane dipole. Uderzając sprężyste i trąc wzajemnie, wytwarzają ciepło, opisanie składową P_e . Bezpośrednim parametrem określającym zdolność do pochłaniania jest współczynnik stratności (dla Al_2O_3 i TiO_2 bardzo mały) lub jego stosunek do składowej rzeczywistej określanej stratnością $\text{tg} \delta = \epsilon'' / \epsilon'$.

Składowa P_e i indukowanie pola magnetycznego odnosi się przede wszystkim do ferromagnetyków (np. Fe, Ni, Co), gdzie poprzez oddziaływanie na domeny magnetyczne (straty spowodowane histerezą, rezonansem domen i spinów elektronów) może być generowane ciepło. Podobnie jak w dielektrykach, zdolność do nagrzewania mikrofalami można opisać tangensem stratności magnetycznej $\text{tg} \delta = \mu'' / \mu'$.

W przypadku metali niebędących ferromagnetykami (Ti, Al) o litej, zwartej strukturze padające promieniowanie indukuje prądy w skali makroskopowej, które z kolei wytwarzają przeciwstawne pole blokujące i odbijające mikrofałe. Jednak jeżeli metal będzie w postaci cząstek pokrytych warstwą izolujących tlenków, można mówić o wnikaniu mikrofal, a powstające prądy w skali makroskopowej będą nagrzewały materiał. Składowa styczna pola magnetycznego promieniowania mikrofalowego zmniejszająca się na głębokości proporcjonalnie do $1/e$ indukuje pole elektryczne na powierzchni cząstek. Powstające prądy powierzchniowe J przy określonej konduktywności σ powierzchni (dla Ti $2,56 \cdot 10^6$ $1/\Omega\text{m}$) dla cząstek kulistych o promieniu r wygenerują ciepło [5]:

$$Q = \frac{3\sigma}{2r} \int_V |J|^2 dV = \frac{6R|E|^2}{\eta^2 r} \quad (2)$$

gdzie η to impedancja próżni (377Ω), $R = 1/\sigma\delta$ - rezystancja powierzchni związana bezpośrednio z głębokością wnikania δ mikrofal, których energia zmniejszyła się do 37% ($1/e$) energii na powierzchni. Dla metali jest zwykle szacowana na $0,1 \div 10 \mu\text{m}$ i może być wyznaczona z zależności:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \sigma \mu}} \quad (3)$$

Przy drobnych proszkach metali udział naskórka w nagrzewaniu rdzenia cząstki jest znaczący, zwłaszcza że ze wzrostem temperatury zwiększa się głębokość wnikania [5]. Indukowane prądy w tej warstwie mogą zmienić własności magnetyczne materiału, nawet jeśli jest on paramagnetykiem (Al, Ti) W pracy [6], wykorzystując teorię Mie-Lorenza, wyznaczono efektywne współczynniki stratności i stwierdzono, że ze wzrostem grubości δ (dokładnie stosunek δ/r) maleje kilkadziesiąt razy współczynnik stratności ϵ'' , natomiast sprzężenie z polem magnetycznym i stratność μ'' osiągają swoje maksimum przy pewnej, średniej wielkości tego stosunku (ok. 20).

Dokładniejsza analiza rozkładu pola i stopnia wnikania mikrofal wymaga również uwzględnienia odmiennej pod względem składu i budowy warstwy wierzchniej. W zależności od stosunku grubości warstwy tlenków do rdzenia, ziarnistości, kształtu cząstek określa się efektywne współczynniki przenikalności. W pracy [7] przyjęto model odnoszący się do materiałów o budowie kompozytowej. Mikrofałe przenikają przez dielektryczną warstwę tlenków i odbijają się od metalicznego rdzenia. Przy pewnych założeniach fala może cztery razy przeniknąć przez określony obszar. Dodatkowo w zależności od umiejscowienia próbki może ona podlegać działaniu maksymalnego pola magnetycznego lub elektrycznego promieniowania mikrofalowego.

Przyjęta w pracy koncepcja polega na wypełnieniu relatywnie plastycznym stopem aluminium porów kształtki zbudowanej z twardych i kruchych faz. Włókna Al_2O_3 powinny nadać kształtce wstępną wytrzymałość, natomiast proszek Ti przereaguje do twardych węglików i tlenków tytanu. Na potrzeby eksperymentu zbudowano specjalną komorę umożliwiającą koncentrację pola i nagrzewanie również materiałów metalicznych.

MATERIAŁY I METODY BADAŃ

Do wytworzenia kształtek użyto proszków firmy AlfaAesar oraz włókien Saffil. Wielkość cząstek Ti, C wynosiła $44 \mu\text{m}$ (-325 mesh), natomiast średnica włókien $\text{Al}_2\text{O}_3 + 4\% \text{SiO}_2$ wahała się w granicach $4 \div 6 \mu\text{m}$. Odpowiednie porcje proszków oraz włókien mieszano w roztworze spoiwa nieorganicznego, który następnie odsączano i prasowano, uzyskując prostopadłościenną próbkę o wymiarach $6 \times 4 \times 1$ cm. Udział objętościowy włókien

wynosił 10%, proszku Ti 10÷12%, natomiast grafitu 5÷15%. Przyjęto uproszczone oznaczenie próbek mówiące o udziale objętościowym włókien Al_2O_3 - A, tytanu - T oraz grafitu - C. Przykładowo próbka opisana symbolem A10T10C6 zawiera 10% Al_2O_3 , 10% Ti i 6% grafitu. Przygotowane kształtki wygrzewano w polu mikrofalowym w celu zainicjowania syntezy spaleniowej i przereagowania składników kształtki z przepływającym gazem CO_2 . Zaprojektowano i zbudowano piec mikrofalowy złożony z prostokątnego falowodu, komory z rurą kwarcową oraz stroika falowodowego zamontowanego na końcu linii [8]. Temperaturę mierzono pirometrem Raytek, model Marathon MM, z zakresem temperatur 500÷3000°C oraz płamką pomiarową o średnicy 0,6 mm. Magnetron zasilano mocą 540 W, podtrzymując plazmę i rozwój syntezy.

Kształtki nasycano stopem aluminium EN-AC AlSi7Mg metodą bezpośredniego prasownia w stanie ciekłym. Próbkę podgrzane do ok. 500°C wkładano do formy, zalewano ciekłym stopem i niemal natychmiast prasowano pod ciśnieniem 40 MPa.

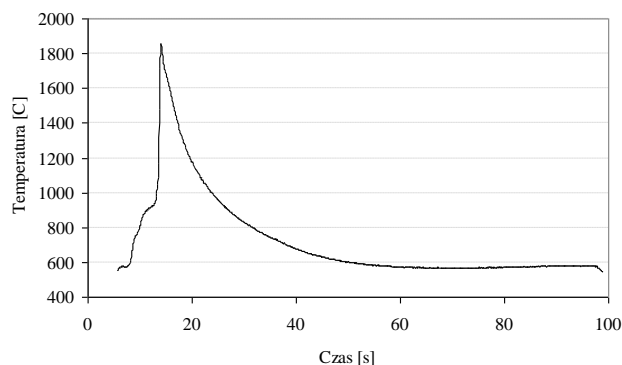
Badania mikroskopowe prowadzono na mikroskopie optycznym oraz skaningowym S-3400N Hitachi wyposażonym w mikroanalizator rentgenowski EDS (4 nm, detektor BSE). Identyfikację fazową wykonano za pomocą proszkowego dyfraktometru rentgenowskiego Rigaku Ultima IV (lampa $\text{Cu}_{K\alpha}$ 40 kV i 40 mA) oraz kart ICDD (2007).

OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Przebieg syntezy spaleniowej, zmiana temperatur, dynamika procesu to czynniki, które analizowano, porównując badane próbki. Maksymalna temperatura syntezy dla próbek bez grafitu wahała się najczęściej w granicach 1560÷1670°C, z 6% C 1500÷1660°C oraz 1560÷1670°C dla próbek zawierających 10% C. Krzywe temperatur wszystkich próbek charakteryzowały się pewnym podobieństwem, choć podatność produktów na nagrzewanie mikrofalami była odmienna. Przedstawiona na rysunku 1 krzywa nie zawiera często obserwowanych odchyłań spowodowanych wyładowaniami i niestabilną plazmą. Działanie mikrofal uwidaczniało się wolniejszym chłodzeniem próbek, a w zakresie temperatur 800÷600°C praktycznie zatrzymaniem spadku temperatury. W próbkach A10T12C6 występowały niekiedy ponowne wzrosty temperatur przypuszczalnie w wyniku spalania nieprzereagowanych resztek substratów.

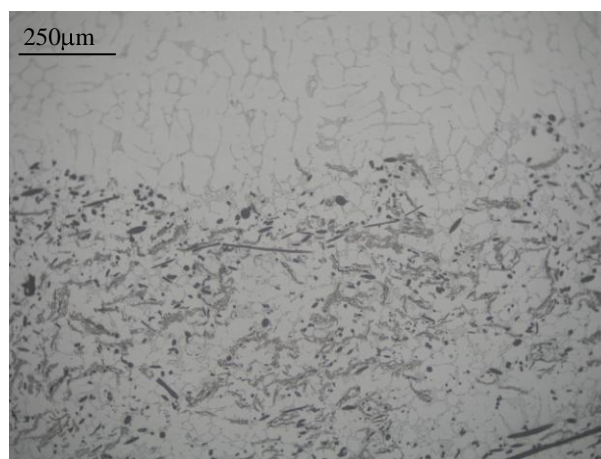
Badania mikroskopowe pozwalały ocenić jakość wytworzonych materiałów i dobrać właściwe parametry procesu tak, aby uzyskać dostateczny stopień jednorodności oraz niewielką ilość wad struktury. Ciekły metal bez trudu przełamywał barierę na powierzchni kształtki i związany z tym wzrost ciśnienia. Typowa struktura siluminu podeutektycznego wewnątrz kształtki uległa rozdrobnieniu (rys. 2). Drobne kryształy krzemu eutektycznego nie zatrzymały się na powierzchni kształtki, nie segregowały i nie wykazywały tendencji do osiadania na

powierzchni umocnienia. Nieco ciemniejsze owalne kształty to włókna tlenku aluminium w przekroju poprzecznym. Obserwacje skaningowe wykazały pewien stopień ich degradacji, spowodowany wysoką temperaturą syntezy. Przypuszczalnie doszło do rozpadu wyjściowej odmiany alotropowej Al_2O_3 z δ na α , zmiany objętości i spękania jeszcze przed nasyceniem stopem aluminium.



Rys. 1. Krzywa temperatury syntezy próbki A10T10C5

Fig. 1. The synthesis temperature profile for A10T10C5 sample



Rys. 2. Mikrostruktura strefy przejściowej pomiędzy nieumocnionym odlewem a kompozytem A10TiC15

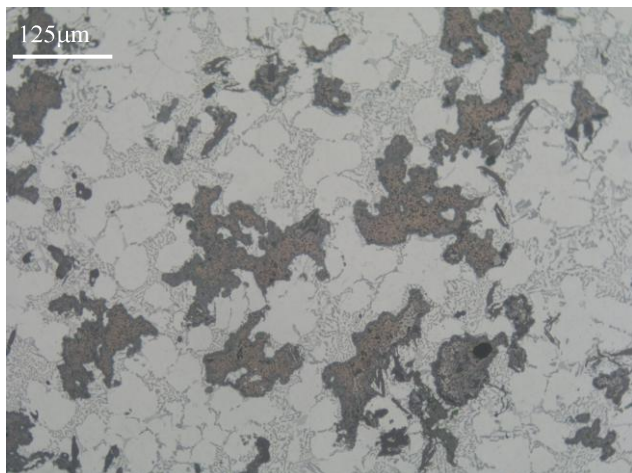
Fig. 2. Microstructure of region between unreinforced area and composite with A10TiC15 preform

Umocnienie najczęściej przyjmowało kształt strzępiastych podłużnych lub bardziej zwartych struktur z drobnymi ziamami. Ich przeciętna wielkość wynosiła 20÷60 μm . Z kolei cząsteczki proszku Ti użyte do przygotowania kształtek nie przekraczały 44 μm . Można zatem stwierdzić, że powstały na ich bazie związki znacznie powiększa swoje rozmiary, tworząc kolonie drobnych ziaren o rozmiarach 3÷5 μm . Często w wyniku gwałtownej reakcji przyjmują one formę skorup z pustym wnętrzem. Po nasyceniu ciekłym metalem w przekroju poprzecznym przedstawiają się jako cienkie pofalowane pasemka, zamykające określony obszar osnowy (rys. 3). Jeżeli niemożliwe jest nasycenie ich środków, można zaobserwować pory.

Synteza kolejnych partii próbek zawierających dodatkowo grafit od 5 do 15% obj. była bardziej stabilna, choć w przypadku 15% zawartości wystąpiły trudności z jej inicjacją. Składniki kształtki były równomierniej rozłożone, bez skupisk czy rzadzisz w wyniku lokalnych zapłonów. Występowały w nich duże naprężenia i znaczna prężność gazów, powodując rozwarstwienie kształtki.

Analiza chemiczna EDS związków na bazie tytanu wykazała obecność złożonych związków zawierających tlen oraz węgiel. W zależności od dostępu do CO₂ reakcja mogła być spowalniana, skutkując bardziej zwartymi wydzieleniami Ti. Wytworzone w wyniku syntezy spalinowej związku tytanu po nasyceniu ciekłym metalem dobrze łączyły się z osnową.

Na rysunku 4 przedstawiono widok wydzielenia - fazy umacniającej z zaznaczonymi punktami analizy chemicznej. Szare struktury w punktach 1 i 4 to w głównej mierze tlenek tytanu TiO (Ti₂O₃) z drobnymi węglkami TiC. Wewnątrz w punkcie 3 występuje większe stężenie Ti, a skład, biorąc po uwagę wyniki z innych punktów, można opisać formułą Ti₅₅O₄₀C₅. Jasne wydzielenie w punkcie 2 zawiera dużo Si, który w tym miejscu był rzadko wykrywany, możliwe, że został wprowadzony razem z penetrującym umocnieniem stopem.

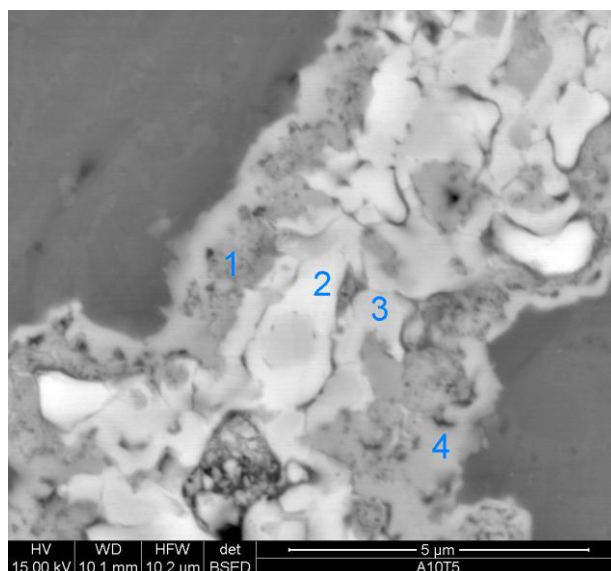


Rys. 3. Mikrostruktura kompozytu umocnionego kształtką A10T12C6. Zaobserwowany ponowny wzrost temperatury po zasadniczej części syntezy może skutkować wytworzeniem się otoczki na związkach Ti

Fig. 3. Optical micrograph of composite reinforced with A10T12C6

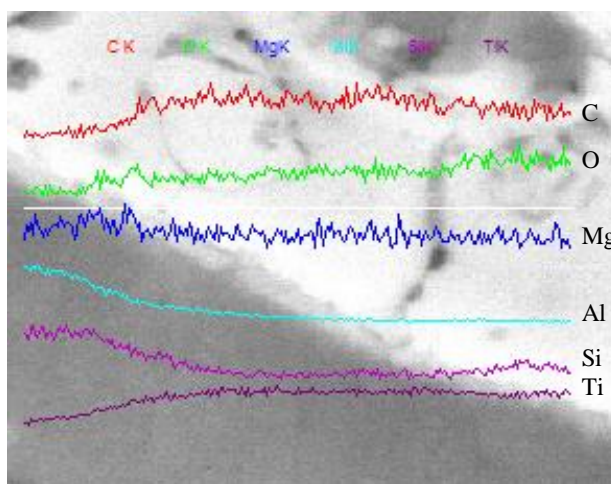
preform. Observed during synthesis second temperature increase may result in forming envelope around Ti compounds

Analiza liniowa (rys. 5) pokazuje nierównomierne rozłożenie węgla oraz tlenu, wskazując na pewnego rodzaju ziarnistą budowę wydzielenia. Ponadto w przeciwieństwie do węgla, który raczej gromadzi się wewnątrz, występuje większa koncentracja tlenu na brzegach wydzielenia. Stężenie pierwiastków na granicy osnowa-umocnienia wykazuje podobną przeciwstawną koncentrację Al i Ti. Ponadto widać wyraźnie stopniową zmianę stężenia pierwiastków, co może świadczyć o dyfuzji i powstaniu dobrego połączenia podczas nasycania kształtki.



Rys. 4. Analiza składu chemicznego próbki A10T5 wyznaczona w punktach 1-4

Fig. 4. Chemical analysis of A10T5 sample at 1-4 points



Rys. 5. Analiza liniowa rozkładu pierwiastków C, O, Mg, Al, Si, Ti na granicy przejścia z osnową

Fig. 5. Linear analysis of C, O, Mg, Al, Si, Ti elements distribution at matrix - reinforcement interface

W wielu próbkach po nasyceniu aluminium występowało nawet wewnątrz umocnienia (5÷10% at.). Biorąc pod uwagę najmniejszą energię swobodną oraz wyniki prac innych autorów [9-11], pomiędzy umocnieniem a infiltrującym stopem aluminium powinna zachodzić reakcja:



Wykonana w kolejnym etapie prac obróbka cieplna wraz z analizą składu chemicznego pokazała, że reakcja podczas infiltracji przebiegała tylko częściowo. Dopiero wygrzewanie w temperaturze 800°C prowadziło do powstania głównie wewnątrz umocnienia tlenku aluminium i Ti w postaci roztworu α, który z czasem dyfundował do osnowy, tworząc iglaste wydzielenia Al₃Ti. Opisana w [12] infiltracja ciśnieniowa kształtek tylko z tlenku TiO₂

wymagała około 5 min przetrzymania ciekłego metalu na zapoczątkowanie reakcji z pośrednimi etapami, gdzie powstawał tlenek Ti_3O_5 oraz roztwór $Ti(Al)$.

Badania twardości HB materiałów kompozytowych pokazały, że twardość stopu nieumocnionego wynosząca 66 HB jest mniejsza od twardości wszystkich rodzajów kompozytów. Ze wzrostem zawartości Ti z 5 na 10% (kształtka A10T5 i A10T10) wyraźnie zwiększa się twardość średnio z 82 na 99 jednostek. Z kolei zwiększenie udziału grafitu do 5÷10% nieznacznie osłabia twardość do około 85 HB. Najlepsze własności wykazywały kompozyty umacniane kształtkami A10T12C6, których twardość wahała się w granicach 95÷107 HB (podobnie jak kompozyty A10TiC15, kiedy przy wytwarzaniu kształtek stosowano mieszanie w młynie kulowym proszków Ti i grafitu).

Rozszerzalność cieplna kompozytów zawierających tę samą ilość włókien Al_2O_3 oraz Ti, natomiast inną zawartość grafitu, 5 i 10%, jest prawie taka sama i wynosi $18\div 20 \cdot 10^{-6}/K$ (osnowa średnio $20\div 22$). Dopiero przy 15% zawartości C wyraźnie zmniejsza się współczynnik rozszerzalności cieplnej, osiągając poziom około 15 jednostek. Niewiele większą rozszerzalnością charakteryzują się kompozyty wytwarzane na bazie kształtek z proszku Ti i płatków grafitu mieszanych w młynie kulowym (A10TiC15). Ogólnie wszystkie rodzaje materiałów kompozytowych charakteryzują się mniejszą rozszerzalnością cieplną niż osnowa.

PODSUMOWANIE

Opracowano metodę wytwarzania porowatych kształtek do umacniania kompozytów na bazie włókien Al_2O_3 , tytanu oraz grafitu. Przygotowaną mieszaninę materiałów wyjściowych nagrzewano w polu mikrofalowym, inicjując i podtrzymując syntezę. Przepływając, gaz CO_2 wchodził w reakcję z tytanem przy udziale plazmy i sporadycznych wyładowań. Niezależnie od składu kształtki krzywe temperatur były w większości przypadku zbliżone. Najwyższą temperaturę syntezy, tj. $1860^\circ C$, zarejestrowano dla próbki A10T10C5.

Obserwacje mikroskopowe ujawniły w większości przypadków niejednorodną strukturę kształtek, z warstwową budową, w różnym stopniu przereagowanymi substratami. Często obserwowano uszkodzone włókna Al_2O_3 oraz strzępiaste związki na bazie tytanu. Mikroanaliza chemiczna EDS (WDS) oraz analiza fazowa X-ray pokazały, że Ti utworzył głównie węgliki oraz tlenki.

Zastosowanie prasowania w stanie ciekłym umożliwia umacnianie, wybranymi kształtkami z jednorodną

budową, odlewów ze stopu aluminium. Obecność bardzo twardych związków na bazie tytanu oraz grafitu jako środka smarującego poprawia odporność kompozytu na ścieranie oraz twardość. Mniejsze wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej zapewniają stabilność wymiarową odlewów, szczególnie umacnianych kształtkami A10T10C10.

Podziękowania

Praca realizowana w ramach projektu badawczego N508 054 31/2810 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

LITERATURA

- [1] Jokisaari J.R., Bhaduri S., Bhaduri S.B., Microwave activated combustion synthesis of titanium aluminides, *Materials Science & Engineering* 2005, A394, 385-392.
- [2] Yaodong Liu, Wei Liu, Mechanical alloying and spark plasma sintering of the intermetallic compound $Ti_{50}Al_{50}$, *Journal of Alloys and Compounds* 2007, 440, 1-2, 154-157.
- [3] Dudek A., Nitkiewicz Z., Characteristics of microstructure in composite surface layers, *Archives of Foundry Engineering* 2008, 8, 1, 75-78
- [4] Rybakov K.I., Semenov V., Microwave heating of electrically conductive materials, *Radiophysics and Quantum Electronics* 2005, 48, 10-11, October, 888-895(8).
- [5] Mishra P., Sethi G., Upadhyaya A., Modeling of microwave heating of particulate metals, *Metallurgical and Materials Transactions B* 2006, 37, 5, October, 839-845.
- [6] Ignatenko M., Tanaka M., Effective permittivity and permeability of coated metal powders at microwave frequency, *Physica B: Condensed Matter* 2010, 405, 1, January, 352-358.
- [7] Buchelnikova V.D., Louzguine-Luzgin D.V., Anzulevicha A.P., Bychkova I.V., Yoshikawa N., Sato M., A Modeling of microwave heating of metallic powders, *Physica B: Condensed Matter* 2008, 403, 21-22, November, 4053-4058.
- [8] Naplocha K., Granat K., Reaction synthesis and microstructure of Al-Ti perform for composite reinforcing, *Archives of Foundry Engineering* 2008, 8, 1, 227-232.
- [9] Mas-Guindal M.J., Benko E., Rodríguez M.A., Nanostructured metastable cermets of $Ti-Al_2O_3$ through activated SHS reaction, *Journal of Alloys and Compounds* 2008, 454, 1-2, April, 352-358.
- [10] Mas-Guindal M.J., Turrillas X.T., Hansen M.A. Rodríguez, Time-resolved neutron diffraction study of $Ti-TiC-Al_2O_3$ composites obtained by SHS, *Journal of the European Ceramic Society* 2008, 28, 15, November, 2975-2982.
- [11] Peng Yu, Zhi Mei, Tjong S.C., Structure, thermal and mechanical properties of in situ Al-based metal matrix composite reinforced with Al_2O_3 and TiC submicron particles, *Materials Chemistry and Physics* 2005, 93, 109-116.
- [12] Gheorghe I., Rac H.J., Reactive Infiltration of 25 vol Pct TiO_2/Al composites, *Metallurgical and Materials Transactions A* 2002, 33, 7, July, 2155-2162(8).