

Krzysztof Naplocha*, Kazimierz Granat

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

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

Otrzymano (Received) 05.02.2008

WYSOKOTEMPERATUROWA SYNTEZA KSZTAŁTEK Al-Cr W POLU MIKROFALOWYM

Opracowano metodę wytwarzania materiałów kompozytowych umacnianych porowatymi kształtkami ze związków międzymetalicznych Al-Cr. Sprasowaną na zimno mieszaninę proszków Al i Cr w stosunku stechiometrycznym od 7:1 do 1:1 w formie cylindrycznych próbek nagrzewano w komorze mikrofalowej. Energia z magnetronu było przesyłana falowodem i za pomocą stroika skupiana na próbce w osłonie argonowej. Po zainicjowaniu samorozwijającej wysokotemperaturowej syntezy (SHS) pole mikrofalowe wyłączano, a reakcja obejmowała całą próbkę. Analiza przebiegu syntezy na podstawie krzywych temperatury pokazała, że ze wzrostem zawartości Cr reakcja osiągała wyższą temperaturę, w krótszym czasie uwalniała się większość energii, występował wyraźny skok temperatury. Przy niesprzyjających warunkach syntezy, odbiegających od warunków przemiany adiabatycznej, w próbce pozostała część nieprzereagowanego proszku Cr. Wokół tych cząstek tworzyła się wyraźna otoczka z około 50% wag. zawartością Cr. Z postępowaniem reakcji czysty chrom powoli przechodził w otoczkę, która ostatecznie zanikała. Wytworzone kształtki zbudowane były ze związków Al-Cr, na powierzchni których występowały drobne wydzielenia. Jednorodna struktura z dostateczną porowatością otwartą nadawała się do nasycenia ciekłym stopem aluminium. Pomimo spotykanej w niektórych przypadkach porowatości w strukturze kompozytów wstępne próby przyniosły zadowalające rezultaty i potwierdziły możliwość umacniania odlewów związkami międzymetalicznymi.

Słowa kluczowe: SHS, kształtka, Al-Cr, nasycanie, kompozyt

THE HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF Al-Cr PERFORM IN MICROWAVE FIELD

Production method for composite materials reinforced with Al-Cr intermetallic compounds was elaborated. At the beginning proper amount of metallic powders were mixed to make specimens with stoichiometric ratio of Al to Cr ranges from 7:1 to 1:1. Next using cold isostatically pressure (CIPed) cylindrical specimens with a diameter of 23-mm and a height of 4.5 mm were prepared. The specimens were placed in microwave chamber to carry out self-propagating high temperature synthesis. Quartz tube with flowing argon protected specimens from atmosphere and oxidization. Microwave energy was transferred from magnetron via standard waveguide and with the help of tuner focused on the specimen. After initiating high-temperature synthesis magnetron was turned off and reaction spread through entire specimen. Alumina blanket partly insulated reacted material, which were ignited by SiC susceptor. Using one-color optical pyrometer Raytek, model Marathon MM with 0.6 mm spot in diameter, profile of temperature during synthesis were measured and recorded. Due to the low exothermic character of the reaction synthesizing Al-Cr intermetallic compounds, cylindrical specimens were preheated to about 870 K. Analyze of profile for different compositions and stoichiometric ratio revealed that with increasing of Cr powder content maximum temperature is higher and heat from exothermic reaction is liberated in a shorter time. In specimens containing smaller amount of Cr, with stoichiometric ratio 7:1, propagation front was unstable and moved with two temperature gradient stops. Microscopic observation of fracture revealed porous morphology with rounded Al-Cr compound covered by small cuboid particles. In some cases when adiabatic conditions was not reached and heat leak rate was too high, cores of Cr particles were surrounded by layer of other Al-Cr compound. This layer was enriched by ca. 50% wt. of Cr. EDS analysis confirmed original concentration of chromium in the centre, which decreased toward outer perimeter. During synthesis enriched layer consumes Cr cores and spreads over external area with smaller Cr content. In order to synthesize Cr with Al completely, material should be insulated or higher amount of chromium powder embedded in aluminum matrix. Some of the synthesized materials with regular morphology and sufficiently open porosity were infiltrated with casting aluminum alloy. Using direct squeeze casting method and typical processing parameters, casting was reinforced with intermetallic structure. It confirmed usefulness of preforms and reduces their natural brittleness.

Keywords: SHS, perform, Al-Cr, infiltration, composite, fibre

WPROWADZENIE

Obecnie najbardziej obiecującą i ekonomiczną metodą wytwarzania związków międzymetalicznych jest samorozwijająca wysokotemperaturowa synteza (SHS) z zapłonem miejscowym bądź objętościowym (VC). Na jej przebieg zwykle wpływa postać substratów, ich morfologia, stosunek stechiometryczny, gęstość nasympowa, technika zapłonu i ilość energii uwalnianej podczas reakcji egzotermicznej. Zwykle za pomocą rozżarzonego włókna, wiązki lasera lub łuku elektrycznego dochodzi do zapłonu i gwałtownego wzrostu temperatury do wartości T_m i rozprzestrzeniania fali zwykle w jednym kierunku. Jeżeli nie zostanie spełnione kryterium T_{ad} (temperatura adiabatyczna) > 1800 K [1] i uwalniana energia w strefie spalania (10+50 μm) jest niewystarczająca do zainicjowania reakcji przed czołem fali propagacji, reakcja syntezy wymagać będzie podtrzymania na przykład poprzez przepływ gazu [2], prądu [3] lub, co budzi obecnie szerokie zainteresowanie, nagrzewanie mikrofalowe.

Podstawowym mechanizmem zamiany energii mikrofal jest tak zwane tarcie dipolowe. W przypadku materiałów odbijających, zazwyczaj metali, istotne jest również zjawisko przepływu prądów i wyzwalającej się energii cieplnej adekwatnej do oporności materiału [4, 5]. W najnowszych badaniach materiałów wieloskładnikowych, jakimi są materiały hybrydowe [6, 7], zwraca się uwagę na tak zwany efekt mikrofalowy, powstający w obszarach, gdzie występuje skokowa zmiana własności dielektrycznych. Obecnie znane są już metody łączenia ceramiki z metalami bądź też samych metali [8, 9].

Połączenie procesów SHS z nagrzewaniem mikrofalowym umożliwia odkrycie szeregu nowych zjawisk i uzyskanie wyjątkowych materiałów. Nagrzewanie mikrofalowe zmienia znacząco typowe prawidłowości procesu SHS. Ważna jest nie tyle gęstość nasympowa, co wzajemne dopasowanie składników mieszaniny i stworzenie jak największej liczby styków [10]. Mikrofałe zwiększają prędkość narastania temperatury, a zatem zmniejszają liczbę faz przejściowych [3]. Stosunkowo łatwe wytworzenie plazmy z gazu obojętnego (Ar) może doskonale posłużyć do wykorzystania mikrofal do syntezy niepodatnych związków metalicznych. Niestety w mikrofalach może również dochodzić do powstawania gorących węzłów [3] i znacznych naprężeń [7]. Wtedy wskazane jest przemieszczanie materiału w polu mikrofalowym bądź przerywane zasilanie magnetronu [11].

W prezentowanej pracy wykorzystano samorozwijającą wysokotemperaturową syntezę (SHS) ze wspomaganie mikrofalowym do wytwarzania porowatych kształtek (preform) ze związków Al-Cr. Dwuskładnikowy układ Al-Cr jest nadal badany i uzupełniany w nowe fazy. Najczęściej wykorzystuje się takie związki międzymetaliczne, które w porządku rosnącego

udziału Cr i w pewnym stopniu temperatury topnienia są następujące: Al_7Cr (lub $\text{Al}_{13}\text{Cr}_2$), $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ (lub Al_5Cr), Al_4Cr , Al_9Cr_4 , Al_8Cr_5 i AlCr_2 [11-14]. Wykorzystanie tych związków w formie cząstek do umacniania aluminiowej osnowy już przy 5% udziale Cr może zwiększyć wytrzymałość oraz twardość [15]. Zwykle jednak znajdują one zastosowanie w elementach pracujących w wysokich temperaturach. Już przy 5÷7% udziale Cr w stopie aluminium wytwarza się zwarta bariera pasywacyjna zwiększająca odporność na korozję i utlenianie w podwyższonych temperaturach [16]. Stąd wykorzystanie tych materiałów w produkcji łopatek turbin gazowych. Podobny efekt można uzyskać, wytwarzając na aluminiowych elementach amorficzne powłoki zawierające np. 18% Cr [17]. Niestety związki te mogą również wykazywać małą odporność na kruche pękanie i wtedy wskazane jest wprowadzenie innych składników, jak to zrobiono w [18], dodając Ni.

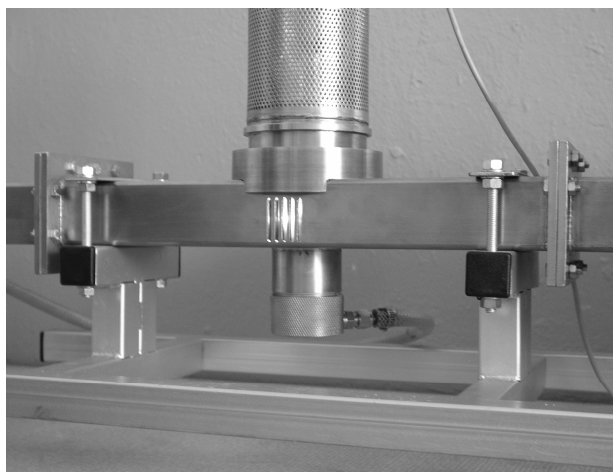
W końcowym etapie badań podjęto próbę nasycenia otrzymanych kształtek odlewniczym stopem aluminium, stosując prasowanie w stanie ciekłym. Naturalna kruchość związków międzymetalicznych, z których wytworzono kształtkę, powinna zostać zmniejszona, a umocniony lokalnie odlew uzyska nowe własności fizyczne. Obserwacje mikrostruktur otrzymanych kompozytów wykazały zadowalającą jednorodność bez większych wad i segregacji. Eliminacja występowania w niektórych próbkach porowatości będzie wymagać dalszych prac nad doбором parametrów procesu nasycania.

MATERIAŁY I METODYKA BADAŃ

Wytwarzanie materiałów składało się z 3 zasadniczych etapów. Na wstępie zmieszano odpowiednie porcje proszków Al i Cr w stosunku stechiometrycznym równym 7:1, 4:1, 3:1, 9:4, 1:1. Przy ustalaniu proporcji uwzględniono potencjalne związki opisywane w układzie dwuskładnikowym Al-Cr. Proszki metali firmy AlfaAesar charakteryzują się dobrą jednorodnością pod względem ziarnistości i składu chemicznego. W pracy przedstawiono tylko badania próbek wykonanych na bazie proszku Al (99,9% Al, -325 mesh) oraz proszku Cr (99,5%, -200 mesh). W celu wytworzenia cylindrycznych próbek o średnicy 23 mm i wysokości 4,5 mm mieszaninę proszków prasowano na zimno pod ciśnieniem 484 MPa.

Wysokotemperaturową syntezę prowadzono w specjalnie skonstruowanej głowicy z kwarcową rurą, w której utrzymywano atmosferę argonu (rys. 1). Zamontowanie głowicy w standardowym falowodzie zakończonym stroikiem umożliwiło dostrojenie i skoncentrowanie pola w komorze grzewczej. W urządzeniu wykorzystano typowy magnetron z zasilaczem o regu-

lowanej mocy 0÷900 W. W prezentowanych badaniach, po kilkusekundowym rozruchu, magnetron zasilano stałą mocą 240 W. Po nagraniu próbki, tuż przed wystąpieniem zapłonu i skokowym wzroście temperatury, zasilanie odłączano. Do pomiaru temperatury używano głównie pirometru Raytek, model Marathon MM, z zakresem temperatur 810÷3270 K. Średnica płamki pomiarowej wynosiła około 0,6 mm. Próbka częściowo zaizolowana włókniną Al_2O_3 dotykała podkładki z SiC silnie pochłaniającej mikrofałę i inicjującej syntezę. Miejsce pomiaru temperatury znajdowało się po przeciwnej stronie próbki w stosunku do miejsca zapłonu.



Rys. 1. Widok głowicy z komorą grzewczą do prowadzenia wysokotemperaturowej syntezy

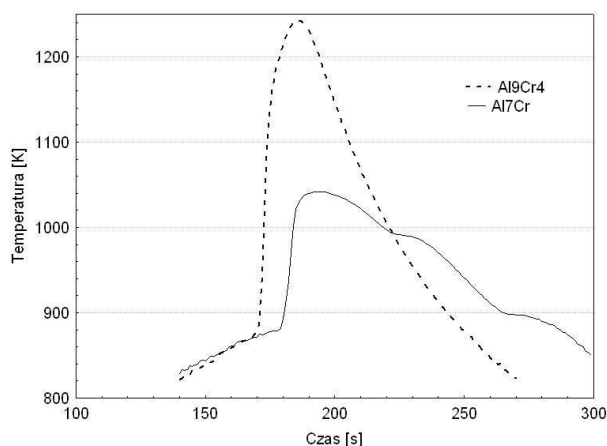
Fig. 1. The view of head with heating chamber for self-propagating high temperature synthesis

Badania struktur wykonano za pomocą mikroskopu optycznego oraz skaningowego JEOL JSM-5800LV z przystawką do analizy chemicznej EDS. Ostatnim krokiem opracowanej technologii była infiltracja kształtek metodą bezpośredniego prasowania w stanie ciekłym. Zastosowano zbliżone do opracowanych w latach ubiegłych [19] parametry procesu ze stosunkowo niewielkim ciśnieniem infiltracji 40 MPa. Wstępne próby, choć przebiegały bez większych trudności, będą wymagały dopracowania w celu wyeliminowania mikroporowatości w strukturze niektórych kompozytów.

WYNIKI BADAŃ

Rejestracja i analiza temperatury próbki w strefie syntezy umożliwia określenie podstawowych parametrów procesu oraz własności termodynamicznych układu. Niemal dla wszystkich prób materiał podgrzewano do temperatury początkowej wynoszącej około 870 K. Zainicjowanie reakcji następowało w miejscu oddalonym od miejsca pomiaru, stąd nie określono dokładnej wartości temperatury zapłonu. Na podstawie obserwacji przebiegu syntezy oraz pomiaru temperatur podkładki inicjującej reakcję można przypuszczać, że znacznie

przewyższa ona temperaturę topnienia aluminium. Dopiero odpowiednie przegrzanie próbki i uzyskanie lokalnego podtopienia proszku aluminium umożliwi swobodny rozwój reakcji w całej objętości próbki. Zatem przytaczana jako temperatura zapłonu [20, 21], w układach z aluminium, temperatura topnienia jest wartością minimalną i może być niewystarczająca. W przeprowadzonych próbach, w przeciwieństwie do danych literaturowych [1, 2, 22], nie zaobserwowano znaczącego wpływu stosunku stechiometrycznego składników, ich granulacji czy wielkości próbki na temperaturę zapłonu. Wyraźne różnice obserwowano w szybkości reakcji, temperatury maksymalnej oraz w morfologii produktów. Uwzględniając możliwe związki dla układu Al-Cr, najwyższą temperaturę syntezy uzyskały te z większą ilością Cr, a zatem o bardziej wyrównanym stosunku wagowym. Dla próbek Al_7Cr , Al_4Cr oraz Al_9Cr_4 temperatury te wynosiły odpowiednio 1042, 1093, 1243 K. Krzywa temperatury syntezy dla dwóch skrajnych składów chemicznych uwidacznia różnice w utrzymywaniu się wysokiej temperatury podczas głównej fazy syntezy (rys. 2). Rozciągnięcie w czasie reakcji i uwalniania energii, jak to mam miejsce w przypadku próbki Al_7Cr , utrzymuje temperaturę na stosunkowo niskim poziomie, obniżając przy tym tempo dyfuzji reagentów.

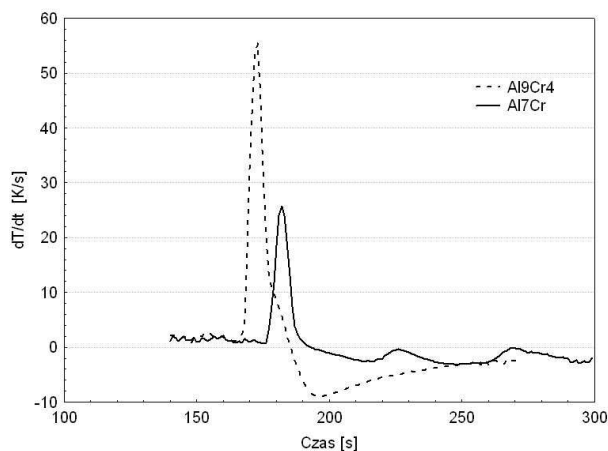


Rys. 2. Krzywe temperatury na powierzchni próbek Al_7Cr i Al_9Cr_4

Fig. 2. Temperature profiles on the surface of Al_7Cr i Al_9Cr_4 samples

Obserwowane dla tej próbki odchylenia krzywej na odcinku chłodzenia mogą świadczyć o niestabilnym przechodzeniu frontu propagacji i oscylacji ognisk reakcji związków najbardziej stabilnych. Potwierdza to przedstawiony na rysunku 3 wykres gradientu temperatur. Dwa przystanki temperatur przy schładzaniu świadczą o nawrocie i wzmocnieniu syntezy uwalniającej kolejne porcje energii. W przypadku próbki Al_9Cr_4 gęściej rozłożone w proszku Al cząstki Cr stanowią liczne miejsca na inicjację syntezy, co prowadzi do wyższej temperatury, szybszej dyfuzji i pełniejszego przereagowania składników. W obu przypadkach tempo narastania temperatury osiąga swoje maksimum, po którym próbka nagrzewa się do temperatury maksymal-

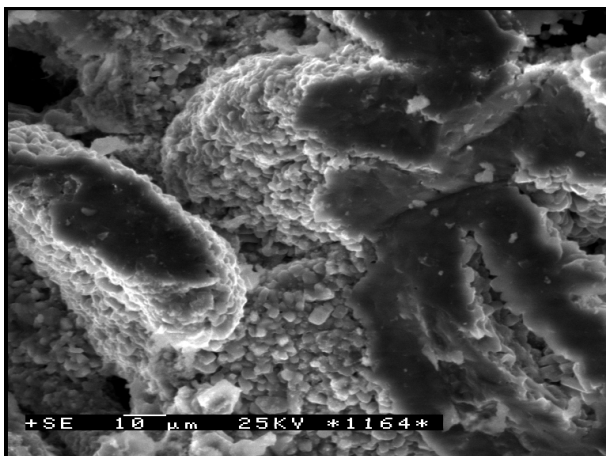
nej T_m , a $dT/dt = 0$. Na odcinku chłodzenia dla próbki Al9Cr4 wcześniej występuje minimum szybkości zmian temperatury ($dT/dt = -8,98$ K/s), a kolejny niemal liniowy odcinek wykresu obrazuje równomierne oddawanie ciepła do otoczenia.



Rys. 3. Szybkości zmian temperatury wyznaczone podczas syntezy próbek Al₇Cr i Al₉Cr₄

Fig. 3. Temperature rate variations determined during synthesis of Al₇Cr i Al₉Cr₄ samples

Obserwacje mikroskopowe przełamów kształtek ujawniły ich charakterystyczną budowę, w której związek Al-Cr tworzył pofałdowane struktury w przekroju podłużne i owalne. Ich powierzchnia była nakrapiana drobnymi wydzieleniami w formie zbliżonej do prostopadłościennych cząstek. Widoczne na rysunku 4 ciemne obszary to przełamane związki Al-Cr, których kształt przypuszczalnie wynika z postaci samego proszku Cr. Większość cząstek Cr przed syntezą była bardziej podłużna niż zaokrąglona.



Rys. 4. Przełamane produkty syntezy - związki Al-Cr (ciemniejsze obszary) pokryte drobnymi wydzieleniami

Fig. 4. Broken synthesis products - Al-Cr compounds (dark areas) covered with small particles

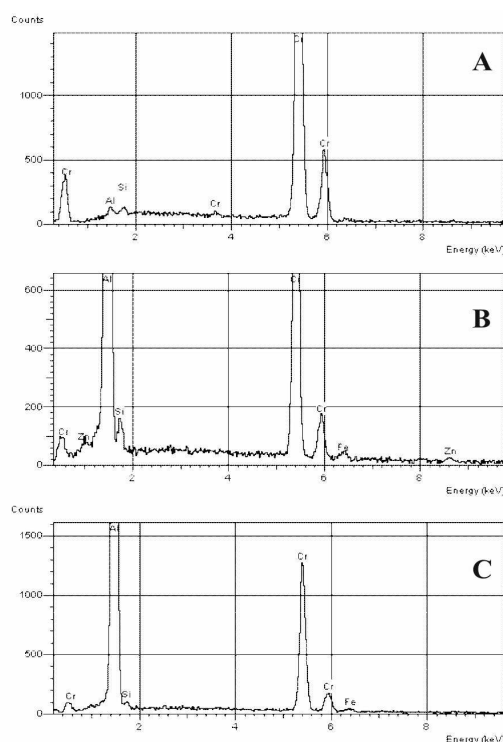
Istotnym zjawiskiem obserwowanym w strukturze niektórych kształtek jest niedostateczny stopień prze-reagowania proszku Cr z Al. Analiza składu chemicz-

nego wokół nieprzereagowanego proszku Cr pokazała nie tylko udział poszczególnych pierwiastków, ale również wniosła informacje na temat przebiegu syntezy. Jasne wydzielenie oznaczone na rysunku 5 punktem A, którego skład chemiczny określono analizą EDS (rys. 6), to niemal wyjściowy proszek Cr. Na początku syntezy wokół niego formuje się obwódka (pkt B), która z postępem reakcji poszerza się w kierunku środka. Po przereagowaniu z Cr związek powoli rozkłada się i przechodzi utworzony wcześniej na zewnątrz związek z przewagą Al (pkt C). Przy drobniejszym proszku Cr lub podtrzymaniu wysokiej temperatury syntezy otoczki się rozpuszczają i struktura kształtki jest jednolita.



Rys. 5. Obszar poddany badaniom EDS z zaznaczonymi miejscami analizy przedstawionej na rysunku 6

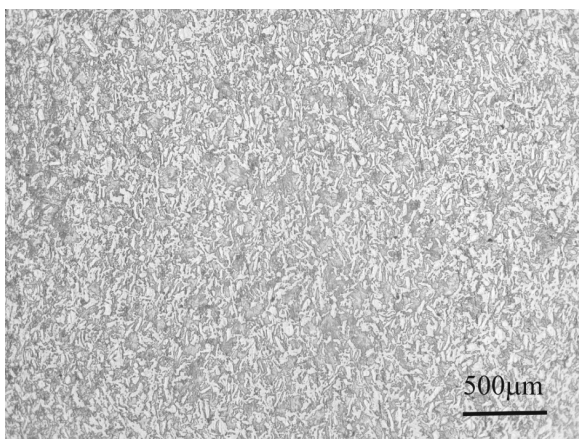
Fig. 5. Examined area with marked points where EDS analysis were performed. Results are presented in Figure 6



Rys. 6. Analiza EDS w punktach zaznaczonych na rysunku 5

Fig. 6. EDS analysis of spots presented in Figure 5

Ostatnim etapem prac między innymi potwierdzającym przydatność wytworzonych kształtek było nasylenie ich ciekłym stopem AlZn11Si2 wraz z analizą otrzymanych mikrostruktur. Stosując typowe parametry prasowania w stanie ciekłym, podgrzewano kształtkę przed nasycaniem do 500°C, a następnie umacniano lokalnie odlew. Obserwacje mikroskopowe pokazały w pełni wypełnione strukturę kształtki (rys. 7), choć w niektórych przypadkach wystąpiły drobne porowatości. Nie dochodziło do przemieszczenia bądź segregacji umocnienia. Struktura była jednorodna i na tym etapie prac można stwierdzić, że wytworzone kształtki można bez większych trudności nasycić ciekłym metalem. Porowata i relatywnie twarda kształtka po nasyceniu powinna uzyskać większą odporność na pękanie oraz nadać umocnionej strefie odpowiednie własności fizykochemiczne.



Rys. 7. Materiał kompozytowy otrzymany poprzez nasycenie kształtki Al-Cr odlewniczym stopem aluminium

Fig. 7. Composite material produced by infiltration of Al-Cr perform with casting aluminium alloy

PODSUMOWANIE

Zastosowanie samorozwijającej wysokotemperaturowej syntezy (SHS) do produkcji kształtek umożliwia wytworzenie jednorodnych struktur międzymetalicznych z odpowiednią porowatością do nasycania ciekłym metalem. Inicjowanie i prowadzenie syntezy przy pomocy energii mikrofalowej intensyfikuje proces, zmienia sposób nagrzewania oraz pozwala kształtować strukturę produkowanych materiałów. W badaniach wykorzystano specjalną komorę mikrofalową, w której można skoncentrować promieniowanie oraz w łatwy sposób kontrolować rozkład pola w zależności od materiału wsadowego. Związki z układu Al-Cr, które stosuje się w elementach odpornych na utlenianie i korozję, tworzą się w temperaturach dochodzących do 1200÷1300 K. Inicjowanie syntezy przypuszczalnie następuje w wyniku nadtopienia proszku Al i obejmuje całą próbkę pod warunkiem, że zostanie ona odpowiednio podgrzana. Front propagacji rozchodzi się szybko

i stabilnie w przypadku większego udziału proszku Cr. Przy mniejszych zawartościach Cr temperatura maksymalna jest niższa, a podczas syntezy temperatura podlega wahaniom. Wytworzone związki formują owalne i pofałdowane struktury pokryte drobnymi wydzieleniami. Jeżeli synteza odbywa się w krótkim czasie, niskiej temperaturze i proszek Cr jest gruboziarnisty, produkty reakcji mogą zawierać nieprzereagowane resztki cząstek Cr. Wokół nich powstaje bogata w Cr wyraźna otoczka, która z postępującą reakcją obejmuje wewnątrz czysty chrom i powoli przechodzi w stabilny związek Al-Cr. Obecne w kształtce otwarte porowatości umożliwiają infiltrację otrzymanych struktur ciekłym metalem. Stosując prasowanie w stanie ciekłym, nasycano porowate kształtki odlewniczym stopem aluminium, uzbrajając lokalnie odlew. Badania struktur kompozytów wykazały prawidłowy stopień wypełniania kształtek oraz zadowalającą jednorodność.

Podziękowania

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

LITERATURA

- [1] Moor J.J., Feng H.J., Combustion synthesis of advanced materials: part I, Reaction Parameters, Progress in Materials Science 1995, 39, 243-273.
- [2] Mossino P., Some aspects in self-propagating high-temperature synthesis, 2004, 30, 311-332.
- [3] Jokisaari J.R., Bhaduri S., Bhaduri S.B., Microwave activated combustion synthesis of titanium aluminides, Materials Science & Engineering 2005, A394, 385-392.
- [4] Siores E., Rego D.Do., Microwave applications in materials joining, Journal of Materials Processing Technology 1995, 48, 1-4 January 15, 619-625.
- [5] Agrawal Dinesh K., Microwave processing of ceramics, Current Opinion in Solid State & Materials Science 1998, 3, 5, October, 480-485.
- [6] Zhou Shuangjie, Hawley Martin C., A study of microwave reaction rate enhancement effect in adhesive bonding of polymers and composites, Composite Structures 2003, 61, 4, September, 303-309.
- [7] Thostenson E.T., Chou T.-W., Microwave processing: fundamentals and applications, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (Incorporating Composites and Composites Manufacturing) 1999, 30, 9, September, 1055-1071.
- [8] Cheng Jiping, Agrawal Dinesh, Roy Rustum, Jayan P.S., Continuous microwave sintering of alumina abrasive grits, Journal of Materials Processing Technology 2000, 108, 1, December 1, 26-29.
- [9] Gupta M., Wong W.L.E., Enhancing overall mechanical performance of metallic materials using two-directional microwave assisted rapid sintering, Scripta Materialia 2005, 52, 479-483.
- [10] Duangduen Atong, Clark D., Ignition behavior and characteristic of microwave-combustion synthesized Al₂O₃, TiC powders, Ceramics International 2004, 30, 1909-1912.

- [11] Audier M., Durand-Charre M., Laclau E., Klein H., Phase equilibria in the Al-Cr system, *Journal of Alloys and Compounds* 1995, 220, 225-230.
- [12] Gruszko B., Kowalska-Strzeciwiłk B., Przepiorzynski B., Surowiec M., Investigation of the Al-Cr g-range, *Journal of Alloys and Compounds* 2005, 402, 98-104.
- [13] Gruszko B., Przepiorzynski B., Kowalska-Strzeciwiłk E., Surowiec M., New phase in the high-Al region of Al-Cr, *Journal of Alloys and Compounds* 2006, 402, L1-L4.
- [14] Vojtech D., Verner J., Serak J., Šimenacik F., Balog M., Nagy J., Properties of thermally stable PM Al-Cr based alloy, *Materials Science and Engineering* 2007, A458, 371-380.
- [15] Torralba J.M., Lancau V., Martinez M.A., Velasco F., P/M aluminium matrix composite reinforced with (AlCr₂)p, *Journal of Material Science Letters* 2000, 19, 1509-1512.
- [16] Muhammad Rostom Ali, Atsushi Nishikata, Tooru Tsuru, Electrodeposition of aluminium-chromium alloys from AlCl₃-BPC melt and its corrosion and high temperature oxidation behaviors, *Electrochimica Acta* 1997, 42, 2347-2354.
- [17] Creus J., Billard A., Sanchette F., Corrosion behaviour of amorphous Al-Cr and Al-Cr-(N) coatings deposited by dc magnetron sputtering on mild steel substrate, *Thin Solid Films* 2004, 466, 1-9.
- [18] Faraoun H., Aourag H., Esling C., Seichepine J.L., Coddet C., Elastic properties of binary NiAl, NiCr and AlCr and ternary Ni₂AlCr alloys from molecular dynamic and Abinitio simulation, *Computational Materials Science* 2005, 33, 184-191.
- [19] Naplocha K., Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 1999.
- [20] Jokisaari J.R., Bhaduri S., Bhaduri S.B., Microwave activated combustion synthesis of titanium aluminides, *Materials Science and Engineering* 2005, A394, 385-392.
- [21] Yeh C.L., Sung W.Y., Combustion synthesis of Ni₃Al intermetallic compound in self-propagating mode, *Journal of Alloys and Compounds* 2004, 384, 181-191.
- [22] Morsi K., Review: reaction synthesis processing of Ni-Al intermetallic materials, *Materials Science and Engineering* 2001, A299, 1-15.