

УДК 532.696:621.92

МАКРОГЕТЕРОГЕННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$

БАШЕВ В. Ф.¹, *д.ф.-м.н, проф.*,
СУХОВАЯ Е. В.^{2*}, *д.т.н, проф.*,
СЫРОВАТКО Ю. В.³

¹Кафедра экспериментальной физики и физики металлов, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 776 58 86, e-mail: bashev@ukr.net

^{2*} Кафедра экспериментальной физики и физики металлов, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 27-76-52, e-mail: sukhovaya@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8002-0906

³ Кафедра экспериментальной физики и физики металлов, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (056) 713-70-00, e-mail: sir-ula-vlad@mail.ru

Аннотация. *Цель.* Использование квазикристаллических сплавов открывает широкие перспективы для создания композиционных материалов с уникальными свойствами. Для увеличения эксплуатационной стойкости необходима разработка новых составов композиционных материалов и технологий их изготовления. *Методика.* Макрогетерогенные композиционные материалы, упрочненные макрогранулами квазикристаллического сплава $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$, изготавливали методом свободной пропитки при температуре 670 °С в течение 20...30 минут. В качестве металлической связки использовали сплав марки АМг30. Структуру композиционных материалов исследовали методами металлографического, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов. *Результаты.* Показано, что метод свободной пропитки позволяет получать практически бездефектную макрогетерогенную структуру композиционного материала АМг30/($Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$). Определены изменения фазового состава структурных составляющих композиционных материалов, вызванные влиянием температурно-временного цикла пропитки. Установлено, что формирование границ раздела между наполнителем и связкой протекает по растворно-диффузионному механизму. В процессе пропитки квазикристаллическая D-фаза сплава-наполнителя растворяется в пропитываемом металле со значительно меньшей скоростью по сравнению с кристаллическими фазами. За счет этого достигается относительное содержание квазикристаллов в структуре композиционных материалов не менее 25%. *Научная новизна.* Впервые для изготовления макрогетерогенных композиционных материалов, упрочненных макрогранулами квазикристаллического сплава, применен метод свободной пропитки. Определены температурно-временные параметры технологического процесса. Показана перспективность использования квазикристаллического сплава $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ в качестве наполнителя и сплава марки АМг30 в качестве металлической связки макрогетерогенного композиционного материала. Изучены закономерности структурообразования границ раздела между наполнителем и связкой композиционных материалов. *Практическая значимость.* Впервые квазикристаллический сплав-наполнитель $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ в виде гранул размерами 0,25...1,5 мм использован в составе макрогетерогенных композиционных материалов, полученных способом свободной пропитки. Гранулы наполнителя, изготовленные из квазикристаллического сплава, имея низкий коэффициент трения и высокую коррозионную стойкость, позволяют продлить срок эксплуатации композиционных покрытий, предназначенных для упрочнения и восстановления узлов трения двигателей внутреннего сгорания, турбокомпрессоров, пар трения торцевого уплотнения насоса дизеля, поршней и других деталей автомобильного транспорта.

Ключевые слова: квазикристаллический сплав-наполнитель; макрогетерогенный композиционный материал; свободная пропитка; смачивание и растворение; структурообразование границ раздела

МАКРОГЕТЕРОГЕННІ КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ КВАЗИКРИСТАЛІЧНОГО СПЛАВУ $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$

БАШЕВ В. Ф.¹, *д.ф.-м.н, проф.*,
СУХОВА О. В.^{2*}, *д.т.н, проф.*,
СИРОВАТКО Ю. В.³

¹ Кафедра експериментальної фізики та фізики металів, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 776 58 86, e-mail: bashev@ukr.net

^{2*} Кафедра експериментальної фізики та фізики металів, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 27-76-52, e-mail: sukhovaya@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8002-0906

³ Кафедра експериментальної фізики та фізики металів, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (056) 713-70-00, e-mail: sir-ula-vlad@mail.ru

Анотація. Мета. Застосування квазікристалічних сплавів відкриває широкі перспективи для створення композиційних матеріалів з унікальними властивостями. Для підвищення експлуатаційної стійкості необхідна розробка нових композиційних матеріалів і технологій їх виготовлення. **Методика.** Макрогетерогенні композиційні матеріали, змінені частинками квазікристалічного сплаву $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$, виготовляли методом вільного просочення при температурі 670 °C протягом 20...30 хвилин. Металевою зв'язкою слугував сплав марки АМг30. Структуру композиційних матеріалів досліджували методами металографічного, рентгеноструктурного та мікрорентгеноспектрального аналізів. **Результати.** Показано, що метод вільного просочення дозволяє отримувати практично бездефектну макрогетерогенну структуру композиційного матеріалу АМг30/($Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$). Визначено зміни фазового складу структурних складових композиційних матеріалів, викликані впливом температурно-часового циклу просочення. Встановлено, що формування границь поділу між наповнювачем і зв'язкою відбувається за розчинно-дифузійним механізмом. У процесі просочення квазікристалічна D-фаза сплаву-наповнювача розчиняється в просочуючому металі зі значно меншою швидкістю порівняно з кристалічними фазами. За рахунок цього досягається відносний вміст квазікристалів у структурі композиційних матеріалів не менше 25%. **Наукова новизна.** Вперше для виготовлення композиційних матеріалів, змішаних частинками квазікристалічних сплавів, застосовано метод вільного просочення. Визначено температурно-часові параметри технологічного процесу. Показано перспективність використання квазікристалічного сплаву $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ як наповнювача та сплаву марки АМг30 як металевої зв'язки макрогетерогенного композиційного матеріалу. Вивчено закономірності структуроутворення границь поділу між наповнювачем і зв'язкою композиційних матеріалів. **Практична значимість.** Вперше квазікристалічний сплав-наповнювач $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ у вигляді гранул розмірами 0,25...1,5 мм застосовано у складі макрогетерогенних композиційних матеріалів, отриманих способом вільного просочення. Гранули наповнювача, виготовлені з квазікристалічного сплаву, маючи низький коефіцієнт тертя та високу корозійну стійкість, дозволяють подовжити термін експлуатації композиційних покриттів, призначених для змінення та відновлення вузлів тертя двигунів внутрішнього згоряння, турбокомпресорів, пар тертя торцевого ущільнення насоса дизеля, поршнів та інших деталей автомобільного транспорту.

Ключові слова: квазікристалічний сплав-наповнювач; макрогетерогенний композиційний матеріал; пічне просочення; змочування і розчинення; структуроутворення границь поділу

MACROHETEROGENEOUS COMPOSITES BASED ON $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ QUASICRYSTAL ALLOY

BASHEV V.F.¹, *Dr. Sc. (Physics&Math.), Prof.*
SUKHOVA O.V.^{2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*
SYROVATKO Yu.V.³

¹ Department of Experimental Physics and Physics of Metals, The Oles' Gonchar Dnipropetrovsk National University, 72, Gagarin Ave., Dnipropetrovsk 49050, Ukraine, tel. +38 (056) 776-58-86, e-mail: bashev@ukr.net

^{2*} Department of Experimental Physics and Physics of Metals, The Oles' Gonchar Dnipropetrovsk National University, 72, Gagarin Ave., Dnipropetrovsk 49050, Ukraine, tel. +38 (0562) 27-76-52, e-mail: sukhovaya@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-8002-0906

³ Department of Experimental Physics and Physics of Metals, The Oles' Gonchar Dnipropetrovsk National University, 72, Gagarin Ave., Dnipropetrovsk 49050, Ukraine, tel. +38 (056) 713-70-00, e-mail: sir-ula-vlad@mail.ru

Abstract. Purpose. Quasicrystal alloys show promise as a way to create composite materials with unique properties. The search for new compositions and fabrication technologies of composites is needed to enhance their performance life. **Methodology.** Macroheterogeneous composites reinforced by macrogranules made of $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ quasicrystal alloy were fabricated by pressure-free infiltration at 670 °C during 20...30 minutes. AМг30 metal alloy was used as binder. The composites' structure was investigated by the methods of metallography, X-Ray analysis and X-Ray microanalysis. **Findings.** It is shown that the method of pressure-free infiltration allows the practically defect-free structure of АМг30/($Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$) composite material to be achieved. The changes in the phase composition of the composites affected by temperature-and-time infiltration cycle were determined. The structure formation of interfaces between the filler and the binder is established to proceed under dissolution-and-diffusion mechanism. During the infiltration quasicrystal D-phase dissolves in the infiltrating metal at much higher rate compared to that of crystal phases. This would account for relative content of the quasicrystals in the composites' structure at the level of not less than 25 pct. **Originality.** For the first time the method of pressure-free infiltration was applied to fabricate macroheterogeneous composite materials reinforced by quasicrystal filler macrogranules. The temperature-and-time process variables were determined. $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ quasicrystal alloy as filler and АМг30 alloy as metal binder are shown to be promising structural components of the macroheterogeneous composites. The peculiarities in structure formation of interfaces between the filler and the binder were studied. **Practical value.** For the first time $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ quasicrystal granules sized from 0,25 to 1,5 mm were used to reinforce macroheterogeneous composite materials fabricated by pressure-free infiltration method. Quasicrystal filler granules showing low friction factor and high resistance to corrosion allow performance life of the composites to prolong. As a result, the suggested composites may be used to strengthen or repair friction units of internal combustion engines, turbine compressors, face seals friction couples of diesel pumps, cylinders and other parts of motor transport.

Keywords: quasicrystal filler; macroheterogeneous composite material; furnace infiltration; wetting and dissolution; interface structure formation

Введение

В последние годы квазикристаллические сплавы привлекают внимание специалистов, занимающихся созданием новых материалов со специальными свойствами. Благодаря уникальной кристаллической структуре квазикристаллов для них характерны сверхнизкий коэффициент трения, высокие коррозионная стойкость, твердость и износостойкость [5,14]. Однако квазикристаллические фазы отличаются хрупкостью, что ограничивает их применение в виде массивных изделий. Этот недостаток можно устранить, используя квазикристаллический сплав в качестве наполнителя композиционных материалов с более легкоплавкой пластичной металлической связкой. В этом случае, благодаря оптимальному распределению напряжений, даже значительные нагрузки не приводят к разрушению материала.

Наиболее распространенным квазикристаллическим сплавом-наполнителем является сплав Al–Cu–Fe. Для изготовления композиционных материалов используют методы холодного прессования квазикристаллических порошков с последующим спеканием [2,9], газоплазменного и газотермического напыления [7,8], принудительной пропитки [9,10] и др. Однако размеры гранул квазикристаллического сплава находятся в пределах 0,002...0,05 мкм, что снижает эксплуатационную стойкость материалов из-за наличия нестабильных межфазных границ большой протяженности. В условиях сухого трения или действия кислых сред эти границы разрушаются, что приводит к выкрашиванию квазикристаллических фаз, появлению на рабочей поверхности сколов, а в конечном итоге к разрушению материала. В результате ресурс работоспособности квазикристаллического сплава остается не использованным. Еще один недостаток композиционных материалов на основе сплава Al–Cu–Fe заключается в негативном влиянии температуры технологического процесса на содержание квазикристаллической фазы при температурах, превышающих 700 °С: оно может уменьшаться до 5 % вследствие превращения квазикристаллической фазы в кристаллическую.

Цель

Целью данной работы является поиск нового квазикристаллического сплава-наполнителя и создание на его основе макрогетерогенного композиционного материала с повышенными эксплуатационными свойствами.

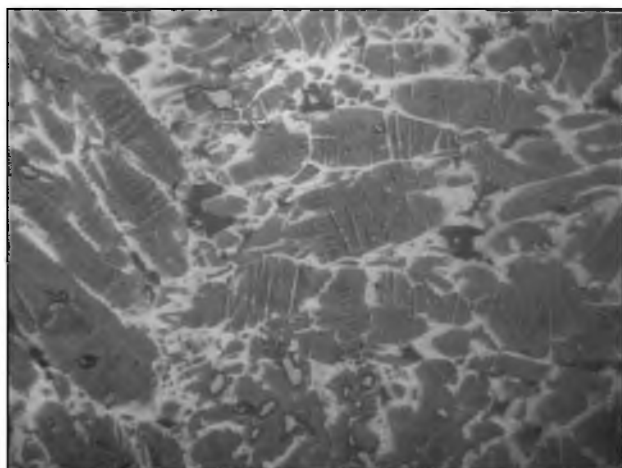
Методика

Для получения макрогетерогенных композиционных материалов использовали метод свободной пропитки (без приложения давления) [1]. Для этого вначале изготавливали исходные структурные составляющие. В качестве наполнителя использовали сплав $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$, в структуре которого образуется декагональная квазикристаллическая D-фаза, стабильная вплоть до температуры ~ 1000 °С [11-13]. Состав сплава контролировали методами химического и рентгенофлуоресцентного анализов. Затем сплав дробили до получения гранул размерами 0,2...2,0 мм. Металлической связкой служил сплав марки АМг30, имевший до пропитки эвтектическую структуру ($\alpha+\beta$). Это позволяло, с одной стороны, благодаря легкоплавкости эвтектики снизить температуру пропитки до 670 °С. А с другой стороны, за счет повышенной жидкотекучести эвтектики, сократить время изотермической выдержки при пропитке до 20...30 минут.

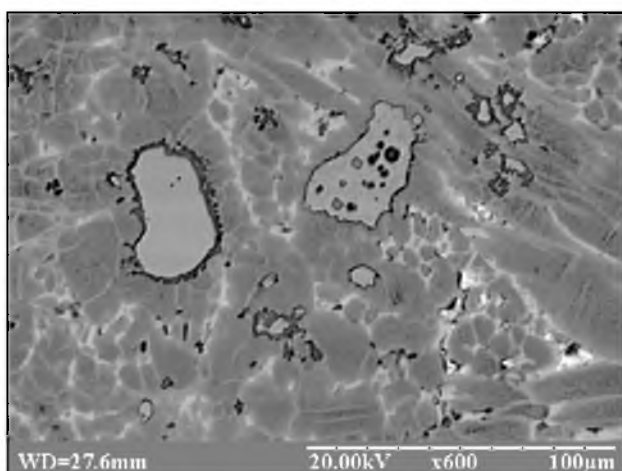
Металлографические исследования структуры сплавов и композиционных материалов осуществляли на микроскопах «GX-51», «Neophot» и «Epiquant». Рентгеноструктурный анализ выполняли на установке ДРОН-УМ в характеристическом излучении Cu-K α . Исследования методом рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) проводили на растровом электронном микроскопе РЭММА102-02 с использованием энергодисперсионного анализатора. Микромеханические характеристики фаз определяли на приборах ПМТ-3 и «DuraScan 20».

Результаты

До пропитки сплав-наполнитель $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ имеет трехфазную структуру (рис. 1). В ней наблюдаются кристаллы квазикристаллической декагональной D-фазы, образующейся по перитектической реакции $\text{Ж} + \beta \rightarrow \text{D}$. По данным рентгеноспектрального микроанализа они имеют стехиометрический состав $Al_{63}Co_{24}Cu_{13}$. Квазикристаллы растут в виде декагональных призм, преимущественно вдоль направления, параллельного оси симметрии 10-го порядка [4,6]. Вдоль этой оси наблюдается периодическое расположение атомов, а в перпендикулярном ей направлении вдоль оси симметрии 2-го порядка – квазипериодическое [15]. В поперечном сечении квазикристаллы имеют вид пятиугольников размерами 90...100 мкм. Стороны пятиугольников гладкие, а их длина изменяется в пределах 40...60 мкм, что вызвано различием локальных условий роста.



а



б

Рис. 1. Микроструктура сплава $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$: а – в отраженном свете, $\times 400$; б – в отраженных электронах, $\times 600$ /

Microstructure of $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ alloy: а – light microscopy image, $\times 400$; б – image in reflected electrons, $\times 600$ /

Относительное содержание квазикристаллической фазы составляет 64,2 % от объема сплава. В центре кристаллов D-фазы расположены включения фазы $Al_4(Co,Cu)_3$ (β' -фаза). Она является вакансионно-упорядоченной β -фазой, представляющей собой твердый раствор меди в конгруэнтной фазе $AlCo$. β -фаза имеет структурный тип $CsCl$ и кристаллизуется из жидкости первой. По ее границам наблюдаются участки третьей гексагональной фазы $Al_3(Cu,Co)_2$ (H-фаза). Описанный фазовый состав сплава подтверждают результаты рентгеноструктурного анализа (рис. 2).

После пропитки макрогранул сплава-наполнителя $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ связкой $AMg30$ макрогетерогенное строение композиционного материала сохраняется (рис. 3). В его структуре зоны контактного взаимодействия возникают только на границах раздела между наполнителем и затвердевшей связкой. Расплавленная связка при контакте с макрогранулами наполнителя вызывает частичное их

растворение. Причем с большей скоростью растворяется кристаллическая фаза $Al_3(Cu,Co)_2$ сплава-наполнителя $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$.

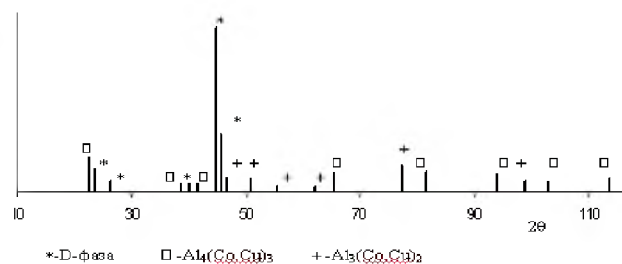


Рис. 2. Штрих-рентгенограмма сплава $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ /

X-ray diffraction groove pattern of $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$ alloy

Со стороны наполнителя, преимущественно вследствие растворения фазы $Al_3(Cu,Co)_2$, при последующей перекристаллизации образуется слой моноклинной фазы $Al_{13}(Co,Cu)_4$ (M-фаза) (рис. 3). Эта фаза имеет неоднородный состав. В центре кристаллов концентрация меди достигает 6,97 %, а на их периферии – 0,53 %. Соответственно, содержание кобальта уменьшается с 38,31 до 33,13 %, а алюминия увеличивается с 53,99 до 65,87 %. Максимальная растворимость магния в этой фазе составляет не более 1 %, снижаясь в направлении от центра кристаллов $Al_{13}(Co,Cu)_4$ к их периферии. Помимо этой фазы в структуре зоны контактного взаимодействия присутствуют дисперсные включения квазикристаллической D-фазы состава $Al_{62}Co_{16}Cu_{22}$ размером 10...25 мкм. Их содержание составляет около 25 об. %. Со стороны затвердевшей связки вместо исходной эвтектической структуры ($\alpha+\beta$) наблюдается конгломерат двух твердых растворов на основе $\alpha-Al$ и промежуточной β -фазы. Первый из них содержит 87,86 % Al; 10,35 % Mg, 1,79 % Cu. Второй имеет следующий состав: 39,73...50,90 % Al; 25,56...46,78 % Cu; 13,58...23,54 % Mg. Растворимость кобальта в структурных составляющих связки практически отсутствует.

Особенности структуры композиционного материала $AMg30/(Al_{65}Co_{20}Cu_{15})$ можно объяснить следующим образом. Вследствие растворения кристаллической фазы наполнителя $Al_3(Cu,Co)_2$ повышается содержание алюминия в расплавленном металле. Поэтому при последующем охлаждении кристаллизация начинается с образования фазы $Al_{13}(Co,Cu)_4$. Зарождение ее кристаллов облегчено на поверхности не растворившихся фаз наполнителя. В результате со стороны наполнителя появляется практически сплошной ободок фазы $Al_{13}(Co,Cu)_4$ с явно выраженными признаками дендритной ликвации. По границам этой фазы последние остатки жидкости затвердевают с образованием квазикристаллической D-фазы, включения которой присутствуют в структуре зоны контактного взаимодействия.

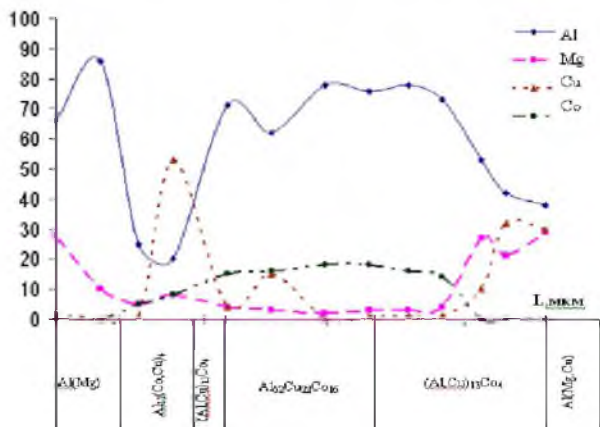
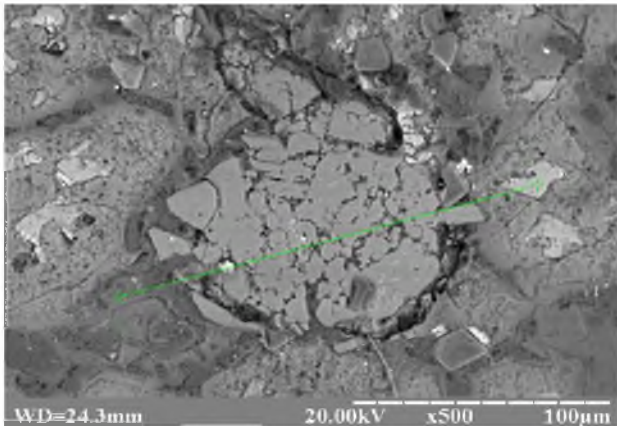


Рис. 3. Микроструктура (x800) и распределение компонентов вдоль произвольного сечения композиционного материала AMg30/(Al₆₅Co₂₀Cu₁₅) /
Microstructure (x800) and components' distribution along random cross-section of AMg30/(Al₆₅Co₂₀Cu₁₅) composite material

Растворение компонентов наполнителя также приводит к изменению состава исходной связки AMg30. Он выходит за пределы концентрационной области, ограниченной эвтектической горизонталью. Как следствие, при кристаллизации связки вначале из

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стабильность композиционных материалов / И. М. Спиридонова, А. Д. Панасюк, Е. В. Суховая, А. П. Уманский. – Днепропетровск: Свидлер, 2011. – 244 с.
Spiridonova I.M., Panasyuk A.D., Sukhovaya E.V., Umanskiy A.P. Stabilitnostj kompozitsionnykh materialov [Composites Stability]. Dnepropetrovsk, Svidler Publ., 2011. 244 p.
<http://no available>
2. Чердышев, В. В. Структура и свойства механоактивированных композиционных материалов Al/квзикристалл Al–Cu–Fe / В. В. Чердышев, С. Д. Калопшкин, И. А. Томилин, Е. В. Шелехов, А. И. Лаптев, А. А. Степашкин, Данилов В. Д. // Физика металлов и материаловедение. – 2007. – Т. 104, № 5. – С. 517–524.
Cherdyshev V.V., Kaloshkin S.D., Tomilin I.A., Shelekhov E.V., Laptsev A.I., Stepashkin A.A., Danilov V.D. Struktura i

жидкости выделяется твердый раствор на основе α -Al. По окончании затвердевания при дальнейшем охлаждении по ограниченной растворимости образуется твердый раствор на основе β -фазы. Соответственно, структура затвердевшей связки представляет собой конгломерат двух твердых растворов.

Научная новизна и практическая значимость

Впервые для изготовления композиционных материалов, упрочненных макрогранулами квазикристаллического сплава Al₆₅Co₂₀Cu₁₅, использован метод печной пропитки.

Установлено, что структурообразование границ раздела между наполнителем и связкой AMg30 при пропитке протекает по растворо-диффузионному механизму. При этом кристаллические фазы сплава-наполнителя растворяются в пропитывающем расплаве с большей скоростью, чем квазикристаллическая D-фаза.

Рекомендуемый состав композиционного материала позволяет создать покрытия на его основе, имеющие повышенные коррозионные и триботехнические характеристики.

Выводы

1. Результаты проведенных исследований показывают перспективность использования метода свободной пропитки для получения макрогетерогенного композиционного материала, упрочненного макрогранулами квазикристаллического сплава-наполнителя Al₆₅Co₂₀Cu₁₅, и покрытий на его основе.
2. По сравнению с композиционными материалами на основе дисперсных квазикристаллических порошков, материал, упрочненный макрогранулами сплава-наполнителя, отличается стабильностью структуры и свойств благодаря уменьшению длины границ раздела между наполнителем и затвердевшей связкой.

svoystva mekhanoaktivirovannykh kompozitsionnykh materialov Al/kvazikristall Al–Cu–Fe [Structure and properties of mechanically activated Al/quasicrystal Al–Cu–Fe composites]. Fizika metallov i metallovedenie – Physics of Metals and Metal Science, 2007, vol. 104, no. 5, pp. 517–524.
<http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?auid=VAF8R0Z27R&lang=ru>

3. Carreno-Morelli, E. Processing and characterization of aluminium-based MMCs produced by gas pressure infiltration / E. Carreno-Morelli, T. Cutard, R. Schaller, C. Bonjour // Mater. Sci. Eng. – 1998. – No. A251. – P. 48–57.
<http://www.elsevier.com/locate/msea>

4. Denoyer, F. Phase transformations in decagonal Al–Cu–Co–Si / F. Denoyer, R. Reich, J. P. Lauriat // Mater. Sci. Eng. – 2000. – No. 294–296. – P. 287–290.
<http://www.elsevier.com/locate/msea>

5. Dubois, J.-M. Properties and applications of quasicrystals and complex metallic alloys / J.-M. Dubois // Chem. Soc. Rev. – 2012. – No. 41. – P. 4760–6777.

<http://www.rsc.org/csr>

6. Holland-Moritz, D. Investigation of the short-range order in melts of quasicrystal-forming Al–Cu–Co alloys by EXAFS / D. Holland, G. Jacobs, I. Egry // *Mater. Sci. Eng.* – 2000. – No. 294–296. – P. 369–372.

<http://www.elsevier.com/locate/msea>

7. Kenzari, S. Formation and properties of Al composites reinforced by quasicrystalline AlCuFeB / S. Kenzari, P. Weisbecker, M. Curulla, G. Geandier, V. Fournee, J. M. Dubois // *Phil. Mag.* – 2008. – V. 88, No. 5. – P. 755–766. <http://dx.doi.org/10.1080/14786430801955253>

8. Laplanche, G. Microstructures and mechanical properties of Al-base composite materials reinforced by Al–Cu–Fe particles / G. Laplanche, A. Joulain, J. Bonneville, R. Schaller, T. El Kabir // *J. All. Comp.* – 2010. – No. 493. – P. 453–460.

<http://www.elsevier.com/locate/jallcom>

9. Lee, S. M. Metal matrix composites reinforced by gas-atomised Al–Cu–Fe powders / S. M. Lee, J. H. Jung, E. Fleury, W. T. Kim, D. H. Kim // *Mater. Sci. Eng.* – 2000. – No. 294–296. – P. 99–103.

<http://www.elsevier.com/locate/msea>

10. Li, Z. Microstructure and mechanical properties of Al–7%Si matrix composites reinforced by Al₆₃Cu₂₅Fe₁₂ icosahedral quasicrystal particles / Z. Li, H. Geng, H. Qin // *Appl. Mech. Mat.* – 2011. – V. 55–57. – P. 1022–1027.

<http://www.scientific.net/AMM.55-57.1022>

11. Meisterernst, G. Understanding Czocharalski growth of decagonal AlCoCu / G. Meisterernst, L. Zhang, P. Dreier, P. Gille // *Phil. Mag.* – 2005. – V. 86, No. 3–5. – P. 323–326.

<http://mc.manuscriptcentral.com/pm-pml>

12. Mi, S. A study of the ternary phase diagram of Al–Co with Cu, Ag and Au / S. Mi, B. Grushko, C. Dong, K. Urban // *J. All. Comp.* – 2003. – No. 354. – P. 148–152.

<http://www.elsevier.com/locate/jallcom>

13. Mukhopadhyay, N. K. Transformation of the decagonal quasicrystalline phase to a B2 crystalline phase in the Al–Cu–Co system by high-energy ball milling / N. K. Mukhopadhyay, G. V. S. Murthy, B. S. Murty, G. C. Weatherly // *Phil. Mag. Lett.* – 2002. – V. 82, No. 7. – P. 383–392.

<http://www.tahdf.co.uk/journals>

14. Trebin, H. R. Quasicrystals. Structure and properties / H. R. Trebin. – Weinheim: Wiley : VCH GmbH & Co. KGaA, 2003. – 665 p.

<http://dnb.ddb.de>

15. Widom, M. Ab initio energetics of transition metal ordering in decagonal Al–Co–Cu / M. Widom, I. Al-Lehyani, Y. Wang, E. Cockayne // *Mater. Sci. Eng.* – 2000. – No. 294–296. – P. 295–298.

<http://www.elsevier.com/locate/msea>

Статья рекомендована к публикации докт. техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); докт. техн. наук, проф. Д. В. Лаухиньым (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015