

УДК 532.696:621.92

## ПРОЦЕССЫ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ПРОПИТКЕ КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

БАШЕВ В. Ф.<sup>1\*</sup>, *д.ф.-м.н, проф.*,  
СУХОВАЯ Е. В.<sup>2</sup>, *д.т.н, проф.*,  
СЫРОВАТКО Ю. В.<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> 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: [bashev@ukr.net](mailto:bashev@ukr.net)

<sup>2</sup> Кафедра 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: [sukhovaya@ukr.net](mailto:sukhovaya@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-8002-0906

<sup>3</sup> Кафедра экспериментальной физики и физики металлов, Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (068) 905-27-90, e-mail: [ula\\_syrovatko@mail.ru](mailto:ula_syrovatko@mail.ru)

**Аннотация.** *Цель.* Использование квазикристаллов в составе композиционных материалов позволяет сохранить их уникальные физико-механические свойства и устранить недостатки, связанные с повышенной хрупкостью. Разработка состава и технологии получения композиционных материалов требует экспериментальных и теоретических исследований закономерностей формирования структуры и свойств зон контактного взаимодействия на границах раздела между структурными составляющими. *Методика.* Макрогетерогенные композиционные материалы, упрочненные квазикристаллическими сплавами-наполнителями Al-Co-Cu и Al-Co-Ni, изготавливали методом печной пропитки при температуре 1100 К в течение 30 минут. В качестве металлической связки использовали латунь Л62. Структуру композиционных материалов исследовали методами металлографического, рентгеноструктурного и микрорентгеноспектрального анализов. Для контроля структурного и фазового состава зон контактного взаимодействия, образующихся между наполнителем и связкой при пропитке, использовали оригинальную методику статистического анализа структуры. *Результаты.* Исследованы структура и свойства зон контактного взаимодействия на границах раздела между наполнителем и затвердевшей связкой композиционных материалов. Предложены двухмерные и трехмерные графические модели зон контактного взаимодействия. Особенности структурообразования композиционных материалов объяснены преимущественным растворением кристаллических фаз наполнителя в расплавленной связке при пропитке. Различные скорости растворения квазикристаллической и кристаллических фаз связаны с пониженной среднегеометрической частотой колебаний атомов в квазикристаллах, вызванной их избыточной теплоемкостью. *Научная новизна.* Предложены составы и технология печной пропитки композиционных материалов на основе латуни, упрочненных квазикристаллическими сплавами-наполнителями Al-Co-Cu и Al-Co-Ni. Изучены закономерности структурообразования зон контактного взаимодействия на границах раздела между наполнителем и связкой. Выполнены теоретические расчеты среднегеометрической частоты колебаний атомов в квазикристаллической и кристаллических фазах. Показана связь этой характеристики со скоростью растворения твердых фаз при воздействии расплавленной связки. Меньшая частота колебаний атомов в квазикристаллической фазе объяснена избыточной теплоемкостью этой фазы. *Практическая значимость.* Разработанный состав макрогетерогенных композиционных материалов, упрочненных квазикристаллическими сплавами-наполнителями Al-Co-Cu и Al-Co-Ni, можно рекомендовать для получения защитных покрытий на поверхности деталей автомобильного транспорта, работающих в условиях трения и воздействия коррозионных сред.

*Ключевые слова:* макрогетерогенный композиционный материал; квазикристаллический наполнитель; печная пропитка; растворение; зона контактного взаимодействия; среднегеометрическая частота колебаний; теплоемкость

## ПРОЦЕСИ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ ПРИ ПРОСОЧЕННІ КВАЗИКРИСТАЛІЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

БАШЕВ В. Ф.<sup>1\*</sup>, *д.ф.-м.н, проф.*,  
СУХОВА О. В.<sup>2</sup>, *д.т.н, проф.*,  
СЫРОВАТКО Ю. В.<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> 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: [bashev@ukr.net](mailto:bashev@ukr.net)

<sup>2</sup> 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: [sukhovaya@ukr.net](mailto:sukhovaya@ukr.net), ORCID ID: 0000-0000-0001-8002-0906

<sup>3</sup> Кафедра експериментальної фізики та фізики металів, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, пр. Гагарина, 72, 49050, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (068) 905-27-90, e-mail: [ula\\_syrovatko@mail.ru](mailto:ula_syrovatko@mail.ru)

**Анотація. Мета.** Використання квазикристалів у складі композиційних матеріалів дозволяє зберегти їх фізико-механічні властивості й усунути недоліки, пов'язані з підвищеною крихкістю. Розробка складу і технології отримання композиційних матеріалів потребує експериментальних і теоретичних досліджень закономірностей формування структури і властивостей зон контактної взаємодії на границях поділу між структурними складовими. **Методика.** Макрогетерогенні композиційні матеріали, зміцнені квазикристалічними сплавами-наповнювачами Al–Co–Cu і Al–Co–Ni, виготовляли за методом пічного просочення за температури 1100 К впродовж 30 хвилин. В якості металічної зв'язки використовували латунь Л62. Структуру композиційних матеріалів досліджували методами металографічного, рентгеноструктурного і мікрорентгеноспектрального аналізів. Для контролю структурного та фазового складу зон контактної взаємодії, що утворюються між наповнювачем і зв'язкою при просочуванні, використовували оригінальну методику статистичного аналізу структури. **Результати.** Досліджено структуру і властивості зон контактної взаємодії на границях поділу між наповнювачем і затверділою зв'язкою композиційних матеріалів. Запропоновано двовимірні і тривимірні графічні моделі зон контактної взаємодії. Особливості структуроутворення композиційних матеріалів пояснено переважним розчиненням кристалічних фаз наповнювача в розплавленій зв'язці при просоченні. Різні швидкості розчинення квазикристалічних та кристалічних фаз пов'язані зі зниженою середньгеометричною частотою коливань атомів у квазикристалах, яка обумовлена надмірною теплоємністю квазикристалічних фаз. **Наукова новизна.** Запропоновано компонентний склад і технологія пічного просочення композиційних матеріалів на основі латуні, зміцнених квазикристалічними сплавами-наповнювачами Al–Co–Cu і Al–Co–Ni. Вивчено закономірності структуроутворення зон контактної взаємодії на границях поділу між наповнювачем і зв'язкою. Виконано теоретичні розрахунки середньгеометричної частоти коливань атомів у квазикристалічній і кристалічній фазах. Показано зв'язок цієї характеристики зі швидкістю розчинення твердих фаз за дії розплавленої зв'язки. Менша частота коливань атомів у квазикристалічній фазі пояснена надлишковою теплоємністю цієї фази. **Практична значимість.** Розроблений склад макрогетерогенних композиційних матеріалів, зміцнених квазикристалічними сплавами-наповнювачами Al–Co–Cu і Al–Co–Ni можливо рекомендувати для отримання захисних покриттів на поверхні деталей автомобільного транспорту, що працюють у умовах тертя і впливу корозійних середовищ.

**Ключові слова:** макрогетерогенний композиційний матеріал, квазикристалічний наповнювач, пічне просочення, розчинення, зона контактної взаємодії, середньгеометрична частота коливань, теплоємність.

## INTERFACIAL PROCESSES DURING INFILTRATION OF THE QUASICRYSTAL-REINFORCED COMPOSITES

BASHEV V.F.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Physics&Math.), Prof.*

SUKHOVA O.V.<sup>2</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*

SYROVATKO Yu.V.<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup> 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: [bashev@ukr.net](mailto:bashev@ukr.net)

<sup>2</sup> 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: [sukhovaya@ukr.net](mailto:sukhovaya@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-8002-0906

<sup>3</sup> Department of Experimental Physics and Physics of Metals, The Oles' Gonchar Dnipropetrovsk National University, 72, Gagarin Ave., Dnipropetrovsk 49050, Ukraine, tel. +38 (068) 905-27-90, e-mail: [ula\\_syrovatko@mail.ru](mailto:ula_syrovatko@mail.ru)

**Abstract. Purpose.** The application of quasicrystals as fillers of composites allows reserving their unique physical-and-mechanical properties and averting the limitations connected with their enhanced brittleness. The development of the composition and technology to fabricate composites demands experimental and theoretical investigation of the peculiarities in the structure and properties formation of the interfacial zones between the filler and binder. **Methodology.** Macroheterogeneous composites reinforced by Al–Co–Cu or Al–Co–Ni quasicrystal fillers were infiltrated at 1100 K during 30 minutes. Л62 brass was used as metallic binder. The structure of the composites was investigated by metallographic, X-ray, and energy dispersive X-ray analyses. To control structural and phase composition of interfacial zones appearing between the filler and binder during infiltration an original method of statistical structural analysis was applied. **Findings.** The structure and properties of interfacial zones between the filler and solidified binder were investigated. The two- and three-dimensional graphic models of the interfacial zones were suggested. The peculiarities in composites structure formation were explained by prevailing dissolution of filler crystal phases in the molten binder during infiltration. The dissolution rates of quasicrystal and crystal phases differed due to reduced average geometric atom vibration frequency of quasicrystals caused by their excess heat capacity. **Originality.** The compositions and furnace infiltration technology to produce brass-based composites reinforced by Al–Co–Cu or Al–Co–Ni quasicrystal fillers were suggested. The peculiarities in the structure formation of the interfacial zones between the filler and binder were investigated. The average geometric atom vibration frequency for quasicrystals were calculated. The dependency of this characteristic on the dissolution rate of filler solid phases in the molten binder was shown. The lower atom vibration frequency of quasicrystals was explained by their excess heat capacity. **Practical value.** The developed macroheterogeneous composites reinforced by Al–Co–Cu or Al–Co–Ni quasicrystal fillers can be recommended as coatings to protect surface of automobile transport parts working under dry friction or corrosive media.

**Keywords:** macroheterogeneous composite material; quasicrystal filler; furnace infiltration; dissolution; interfacial zone; average geometric vibration frequency; heat capacity

## Введение

Квазикристаллические сплавы обладают рядом уникальных свойств, таких как сверхнизкий коэффициент трения, высокие коррозионная стойкость, твердость и износостойкость. Однако применение квазикристаллов ограничено из-за их повышенной хрупкости. Для того чтобы устранить указанный недостаток квазикристаллические сплавы используют в качестве сплава-наполнителя композиционных материалов. В качестве связки обычно используют более легкоплавкий пластичный материал. Вследствие комбинации свойств, присущих квазикристаллам и пластичному сплаву-связке, удастся создать композиционный материал с высокими эксплуатационными свойствами.

Предыдущие исследования [2,5,7,8] показали перспективность использования в качестве наполнителя квазикристаллических сплавов Al-Co-Cu и Al-Co-Ni, а в качестве связки – сплавов на основе меди. Данные композиционные материалы отличаются высокой стабильностью структуры и свойств. Однако при их изготовлении связка проникает вглубь наполнителя по границам квазикристаллической фазы. Вследствие этого композиционные материалы утрачивают макротвердое строение, что негативно сказывается на их свойствах. Поэтому в работе исследовали процессы контактного взаимодействия на границах раздела композиционных материалов с целью разработки оптимального состава и технологии изготовления.

## Цель

Цель данной работы – оценить растворимость кристаллических и квазикристаллических фаз наполнителя в сплаве-связке при пропитке композиционных материалов, а также установить связь последней со средней геометрической частотой колебаний атомов в решетке этих фаз.

## Методика

Композиционные материалы изготавливали методом печной пропитки. Сплавы-наполнители Al-Co-Cu и Al-Co-Ni выплавляли в печи Таммана. Скорость их охлаждения составляла 50 К/с. Состав сплавов контролировали методами химического и рентгенофлуоресцентного анализов. Затем сплавы дробили до получения гранул размерами 0,2...2,0 мм. В качестве сплава-связки использовали латунь марки Л62. Композиционные материалы пропитывали при 1100 К в течение 30 минут.

Металлографические исследования структуры осуществляли на микроскопах «GX-51», «Neophot» и «Epiquant». Рентгеноструктурный анализ выполняли на установке ДРОН-УМ в характеристическом излучении Cu-K $\alpha$ . Исследования методом рентгеноспектрального микроанализа проводили на растровом электронном микроскопе РЭММА102-02 с использованием энергодисперсионного анализатора.

Микромеханические характеристики фаз определяли на приборах ПМТ-3 и «DuraScan 20».

С помощью специальной программы [9,11] строили двухмерные и трехмерные графические модели зон контактного взаимодействия на границах раздела между наполнителем и связкой композиционных материалов. Для этого сканировали фотографии микроструктуры и получали зависимости интенсивности отраженного от поверхности шлифа света от координаты среза.

## Результаты

Фазовый состав исследованных сплавов-наполнителей Al-Co-Cu и Al-Co-Ni приведен в таблице 1.

Таблица 1

### Результаты определения относительного содержания и микротвердости фаз в сплавах Al-Co-Cu и Al-Co-Ni /

### The results of measurement of relative phase content and microhardness of Al-Co-Cu and Al-Co-Ni alloys

Сплав	Фазы	Относительное содержание, об. %	Микротвердость ГПа
Al-Co-Cu	Al <sub>63</sub> Co <sub>24</sub> Cu <sub>13</sub>	64,2±1,3	1474,87±389,31
	Al <sub>4</sub> (Co,Cu) <sub>3</sub>	8,2±0,2	8453,86±586,35
	Al <sub>3</sub> (Co,Cu) <sub>2</sub>	27,6±0,6	8942,50±657,71
Al-Co-Ni	Al <sub>69</sub> Co <sub>21</sub> Ni <sub>10</sub>	59,2±1,2	1073,20±113,74
	Al <sub>9</sub> (Co,Ni) <sub>2</sub>	23,2±0,5	7262,88±595,40
	Al <sub>9</sub> (Ni,Co) <sub>2</sub>	17,6±0,4	8684,93±437,54

В сплаве Al-Co-Cu квазикристаллическая декагональная D-фаза (Al<sub>63</sub>Co<sub>24</sub>Cu<sub>13</sub>) образуется по перитектической реакции Ж+Al<sub>4</sub>(Co,Cu)<sub>3</sub> → D+Al<sub>3</sub>(Cu,Co)<sub>2</sub>. В сплаве Al-Co-Ni D-фаза (Al<sub>69</sub>Co<sub>21</sub>Ni<sub>10</sub>) имеет первичное происхождение. Результаты определения микротвердости показывают, что наибольшие значения этой характеристики имеют кристаллы D-фазы (табл. 1).

После пропитки гранул сплавов Al-Co-Cu и Al-Co-Ni латунной связкой на границах раздела образуются зоны контактного взаимодействия (рис. 1,2). Вследствие того, что расплавленный металл проникает вглубь сплавов-наполнителей по границам D-фазы, кристаллические фазы Al<sub>3</sub>(Cu,Co)<sub>2</sub> и Al<sub>9</sub>(Co,Ni)<sub>2</sub> сплавов Al-Co-Cu и Al-Co-Ni соответственно почти полностью растворяются в связке. Морфология квазикристаллов изменяется с плоскогранной на округлую. Их размеры составляют 30...40 мкм. Пики, образованные на трехмерной поверхности, отражают не растворившиеся остатки квазикристаллической фазы (рис. 1,в, 2,в).

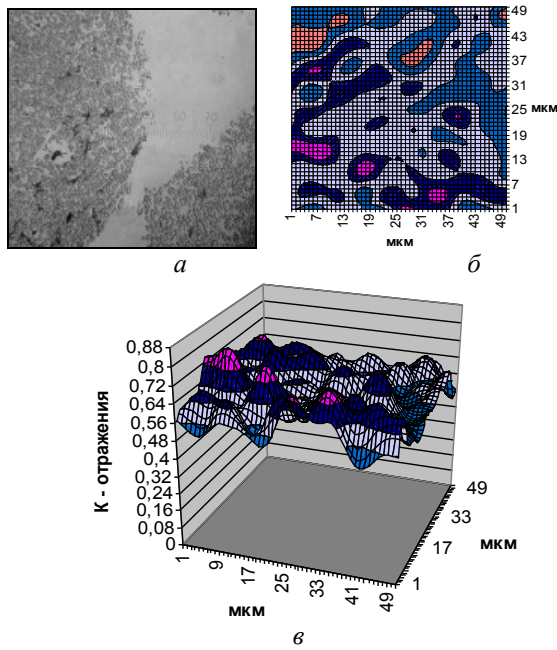


Рис.1. Микроструктура,  $\times 100$  (а), двухмерная (б) и трехмерная (в) графические модели зон контактного взаимодействия композиционного материала, упрочненного наполнителем Al-Co-Cu / *Microstructure,  $\times 100$ , two-dimensional (б) and three-dimensional graphic models of interfacial zones of (Al-Co-Cu)-reinforced composites*

При взаимодействии наполнителей с латунной связкой квазикристаллическая D-фаза перитектического происхождения в сплаве Al-Co-Cu растворяется быстрее, чем эта же фаза, кристаллизующаяся непосредственно из жидкости, в сплаве Al-Co-Ni. Как следствие, объем не растворившейся квазикристаллической фазы в структуре зон контактного взаимодействия сплавов Al-Co-Cu и Al-Co-Ni составляет  $\sim 15$  и  $\sim 30$  % соответственно. Следовательно, для пропитки латуны более предпочтителен сплав Al-Co-Ni.

### Обсуждение результатов

При взаимодействии кристаллических фаз с расплавом, основным компонентом которого является медь, происходит быстрое их растворение. Для температур, намного больших температуры Дебая  $\theta$ , т.е. когда выполняется соотношение  $\theta \ll T$ , справедливо выражение [10]

Считая давление постоянным, можно сделать вывод о том, что  $d\theta/dP \approx const$ . Поскольку значение  $\theta$  маловариабельно, то очевидно, что теплоемкость и коэффициент теплового расширения связаны линейной зависимостью. Следовательно, для кристаллической и квазикристаллической фаз наполнителя можно оценить величины среднегеометрических частот колебаний атомов в выражении (1).

$$\varpi = \varpi_0 e^{\frac{\alpha V_0 P}{Nc}} \quad (1)$$

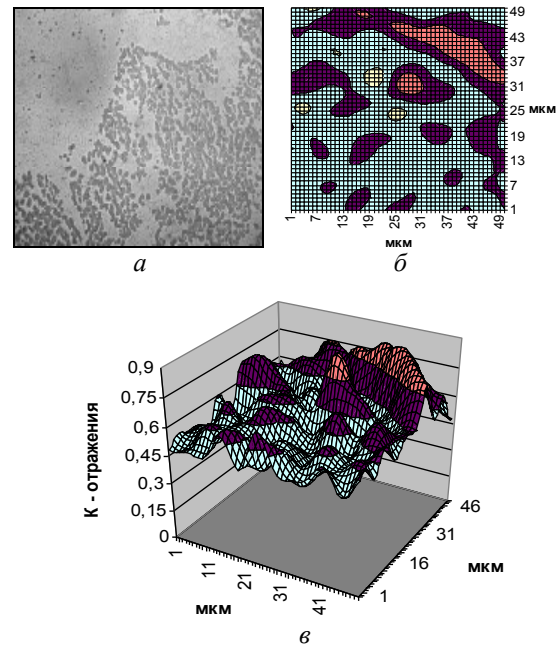


Рис. 2. Микроструктура,  $\times 100$  (а), двухмерная (б) и трехмерная (в) графические модели зон контактного взаимодействия композиционного материала, упрочненного наполнителем Al-Co-Ni / *Microstructure,  $\times 100$ , two-dimensional (б) and three-dimensional graphic models of interfacial zones of (Al-Co-Ni)-reinforced composites*

Для сильно анизотропных кристаллов эти фазы можно рассматривать как слоистые структуры, в которых присутствует взаимодействие между слоями. В таких структурах наблюдаются как колебания атомов в самих слоях с частотами  $\omega_{1,2}$  (основная компонента колебательных процессов), так и колебания слоев относительно друг друга с частотой  $\omega_3$ . Также существуют колебания изгибов самих слоев с групповой скоростью  $\gamma$ .

Приближенные дисперсионные соотношения можно выразить следующим образом [10,6]:

$$\omega_{1,2}^2 = U_{1,2}^2 \chi^2 + u_3^2 k_z^2, \quad \omega_3^2 = u_3^2 \chi^2 + u_4^2 k_z^2 + \gamma^2 \chi^4, \quad (2)$$

где скорости звуковых волн  $U_1$  и  $U_2$  связаны с колебаниями атомов в плоскости слоев,  $u_3$  – с колебаниями сдвига слоев относительно друг друга, а также изгибов слоев,  $u_4$  – с колебаниями относительного расстояния между слоями (причем  $U_1, U_2 \gg u_3, u_4$ );  $k_x, k_y, k_z$  – соответствующие волновые вектора,  $\chi^2 = k_x^2 + k_y^2$  – плоскостной коэффициент жесткости.

Считая, что  $U_1 \sim U_2, u_3 \sim u_4$ , введем в рассмотрение наибольшую из дебаевских температур  $\theta = \hbar \omega_m$ , где  $\omega_m \approx u/a$  – предельная частота жестких колебаний (где  $a$  – постоянная решетки). Предельная частота волн изгиба имеет такой же порядок, как и  $\omega_m$ . Это

значит, что  $\gamma \approx \omega_m a^2$ . Групповая скорость  $\gamma$  связана с поперечной жесткостью слоев.

С учетом вклада звуковых колебаний при условии, характерном для высоких температур  $\hbar\gamma\chi^2 \ll T$ , где  $\gamma\chi_{\max}^2 = \omega_{3\max}$ , для свободной энергии  $F$  получим

$$F = \pi T \chi_{\max}^2 \ln \frac{\hbar\omega_{3\max}}{T} - \pi T \chi_{\max}^2 = \pi T \chi_{\max}^2 \left[ \ln \frac{\hbar\omega_{3\max}}{e} - \ln T \right]. \quad (3)$$

Для энтропии  $S = -\frac{\partial F}{\partial T}$  можно записать

$$S = -\pi \chi_{\max}^2 \ln \hbar\omega_{3\max} + 2\pi \chi_{\max}^2 - \pi \chi_{\max}^2 \ln T, \quad (4)$$

и для энергии

$$E = F + TS = \pi T \chi_{\max}^2. \quad (5)$$

Тогда теплоемкость

$$C = \frac{\pi \omega_{3\max}}{\hbar\gamma} = \pi \chi_{\max}^2. \quad (6)$$

Это дает возможность предположить, что теплоемкость кристаллической фазы наполнителя в интервале температур пропитки не зависит от температуры и определяется только коэффициентами жесткости  $\chi^2$  в плоскости  $dx \cdot dy$ . Данное заключение справедливо при значительном ослаблении связей между слоями, что обуславливает проявление зависимостей согласно закону Дюлонга и Пти и достижение предельных частот  $\omega$ , при которых происходит растворение кристаллической фазы.

Для квазикристаллической фазы характерно значительно большее значение коэффициента поверхностного натяжения по сравнению с этой характеристикой для кристаллической фазы. Это, в свою очередь, обуславливает низкие скорости растворения квазикристаллов в расплавленной латуни при пропитке. Как следствие сохраняются связи между слоями анизотропной структуры.

В случае квазикристаллической фазы для  $\omega_3$  можно записать

$$\omega_3^2 = u_3^2 k_4^2 + \gamma^2 \chi^4. \quad (7)$$

Тогда свободную энергию определяют из интегрального соотношения

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \ln \left[ 1 - \exp \left( -\frac{\hbar}{T} \sqrt{u_3^2 k_z^2 + \gamma^2 \chi^4} \right) \right] 2\pi \chi d\chi dk_z = const \cdot \frac{T^2}{u_3 \gamma}. \quad (8)$$

Таким образом, для теплоемкости квазикристаллов предполагается линейная зависимость от температуры, т.е.

$$C_p \approx const T. \quad (9)$$

Соответственно, должно наблюдаться отклонение теплоемкости квазикристаллической фазы от величины  $3R$ , определяемой законом Дюлонга и Пти. Данную закономерность подтверждают исследования авторов [3], указывающих на так называемый феномен избыточной теплоемкости квазикристаллов. Теплоемкость в диапазоне температуры пропитки составляет  $\sim 33$  Дж/моль·К, что превышает уровень Дюлонга и Пти, равный  $\sim 25$  Дж/моль·К. Согласно исследованиям ряда авторов [3,1,4] рост избыточной

теплоемкости квазикристаллов близок к линейной зависимости, что вытекает из соотношения (9).

Благодаря избыточной теплоемкости квазикристаллической фазы ее энергия распределяется между большим, чем у кристаллической фазы, числом степеней свободы. С этим связано уменьшение среднегеометрической частоты колебаний атомов и снижение скорости растворения квазикристаллов при пропитке.

Кроме того, значение  $C_p$  для квазикристаллической фазы больше, чем для кристаллической, так как количество степеней свободы  $l$  у этой фазы больше. Соответственно среднегеометрическая частота  $\omega = \frac{1}{l} \sum_a \ln \omega_a$  у

квазикристаллов будет меньше (где  $\omega_a$  компоненты частот). Это объясняет устойчивость квазикристаллических фаз сплавов Al–Cu–Co и Al–Ni–Co по сравнению с кристаллическими фазами при взаимодействии с латунию.

### Научная новизна и практическая значимость

В данной работе впервые методом печной пропитки изготовлены композиционные материалы, упрочненные квазикристаллическими сплавами Al–Cu–Co и Al–Ni–Co.

Определены структура и свойства зон контактного взаимодействия, образующихся на границах раздела композиционных материалов между наполнителем и связкой.

Построены двух- и трехмерные графические модели зон контактного взаимодействия, позволившие сравнить скорости растворения кристаллических и квазикристаллических фаз наполнителя в расплавленной латуни при пропитке.

Показана связь скорости растворения фаз со среднегеометрической частотой колебания атомов. Различие частот колебаний объяснено избыточной теплоемкостью квазикристаллической фазы.

### Выводы

1. При исследовании зон контактного взаимодействия, образующихся на границах раздела композиционных материалов, упрочненных сплавами Al–Cu–Co и Al–Ni–Co, выявлено, что кристаллические фазы наполнителя растворяются с большей скоростью, чем квазикристаллические фазы.

2. Установлено, что квазикристаллический сплав-наполнитель Al–Ni–Co более предпочтителен для контакта с латунной связкой, так как после пропитки в структуре композиционных материалов сохраняется большее количество не растворившейся квазикристаллической фазы.

3. Причиной меньшей скорости растворения квазикристаллов в расплавленной латунной связке при пропитке является более низкая среднегеометрическая частота колебаний атомов в их решетке. Это является следствием большего числа

степеней свободы у квазикристаллической фазы, чем у кристаллической.

4. Латунная связка при пропитке не нарушает связей между слоями анизотропной структуры

квазикристаллических фаз сплавов-наполнителей Al–Co–Cu и Al–Co–Ni, о чем свидетельствует феномен избыточной теплоемкости этих фаз.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Башев В.Ф. Макрогетерогенные композиционные материалы на основе квазикристаллического сплава  $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$  / В. Ф. Башев, Е. В. Суховая, Ю. В. Сыроватко // Сборник научных трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение». – 2015. – № 80. – С.32-37.
2. Башев В. Ф. Статистический анализ микроструктуры композиционных материалов / В. Ф. Башев, Е. В. Суховая, Ю. В. Сыроватко // Сборник научных трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение». – 2012. – № 64. – С.53-57.
3. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела / Ч. Киттель. – Москва: Наука, 1978. – 791 с.
4. Ландау Л. Д. Статистическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва: Наука, 1976. – 583 с.
5. Прекул А. Ф. Высокотемпературная теплоемкость квазикристалла  $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$  / А. Ф. Прекул, В. А. Казанцев, Н. И. Щеголихина, Р. И. Гуляева, К. Edagawa // Физика твердого тела. – 2008. – Т.50, № 11. – С. 1933-1935.
6. Прекул А. Ф. Калориметрическое исследование электронных и решеточных возбуждений икосаэдрического квазикристалла в области умеренных температур / А. Ф. Прекул, Е. В. Шаповалова, Н. И. Щеголихина // Физика твердого тела. – 2010. – Т.52, № 9. – С.1675-1680.
7. Прекул А. Ф. Сравнительное исследование теплоемкости икосаэдрических квазикристаллов в твердом и жидком состояниях / А. Ф. Прекул, Н. И. Щеголихина, А. Б. Гайдученко, К. И. Грушевский // Физика твердого тела. – 2011. – Т.53, № 10. – С.1885-1888.
8. Суховая Е. В. Закономерности структурообразования межфазных границ раздела в композиционных материалах / Е. В. Суховая, Ю. В. Сыроватко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – 2011. – № 8(162), Ч.2. – С. 177-184.
9. Суховая Е. В. Структурообразование границ раздела в композиционных материалах, армированных квазикристаллическим сплавом-наполнителем Al–Co–Cu / Е. В. Суховая, Ю. В. Сыроватко // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 2014. – № 47. – С.58-65.
10. Сыроватко Ю. В. Структурообразование композиционных материалов, упрочненных квазикристаллами / Ю. В. Сыроватко, Е. В. Суховая // Вісник Дніпропетровського університету. Ракетно-космічна техніка. – 2013. – Т.21, № 4. – С.113-121.
11. Sukhova O. V. Metal matrix composites reinforced with Al–Co–Cu particles / O. V. Sukhova, Yu. V. Syrovatko // Вісник Дніпропетровського університету. Фізика. Радіоелектроніка. – 2016. – Т.24, № 23. – С.53-58.

### REFERENCES

1. Bashev V. F. Makroheterogennye kompozicionnyye materialy na osnove kvazikristallicheskogo splava  $Al_{65}Co_{20}Cu_{15}$  / V. F. Bashev, E. V. Sukhovaya, Yu. V. Syrovatko // Sbornik nauchnykh trudov «Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie». – 2015. – № 80. – S.32-37.
2. Bashev V. F. Statisticheskiy analiz mikrostruktury kompozicionnykh materialov / V. F. Bashev, E. V. Sukhovaya, Yu. V. Syrovatko // Sbornik nauchnykh trudov «Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie». – 2012. – № 64. – S.53-57.
3. Kittel' Ch. Vvedenie v fiziku tverdogo tela / Ch. Kittel'. - Moskva: Nauka, 1978. – 791 s.
4. Landau L. D. Statisticheskaya fizika / L. D. Landau, E. M. Lifshic. – Moskva: Nauka, 1976. – 583 s.
5. Prekul A. F. Vysokotemperaturnaya teployemkost' kvazikristalla  $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$  / A. F. Prekul, V. A. Kazancev, N. I. Shchegolikhina, R. I. Gulyaeva, K. Edagawa // Fizika tverdogo tela. – 2008. – T.50, № 11. – S. 1933-1935.
6. Prekul A. F. Kalorimetricheskoe issledovanie elektronnykh i reshetochnykh возбуждений икосаэдрического квазикристалла в области умеренных температур / A. F. Prekul, E. V. Shapovalova, N. I. Shchegolikhina // Fizika tverdogo tela. – 2010. – T.52, № 9. – S.1675-1680.
7. Prekul A. F. Sravnitel'noe issledovanie teploemkosti икосаэдрических квазикристаллов в твердом и жидком состояниях / A. F. Prekul, N. I. Shchegolikhina, A. B. Gaiduchenko, K. I. Grushevskiy // Fizika tverdogo tela. – 2011. – T.53, № 10. – S.1885-1888.
8. Sukhovaya E. V. Zakonomernosti strukturoobrazovaniya mezhfaznykh granic razdela v kompozicionnykh materialakh / E. V. Sukhovaya, Yu. V. Syrovatko // Visnik Shidnoukrains'kogo nacional'nogo universitetu im. V.Dalya. – 2011. – № 8(162), Ch.2. – S. 177-184.
9. Sukhovaya E. V. Strukturoobrazovanie granic razdela v kompozicionnykh materialakh, armirovannykh kvazikristallicheskim splavom-napolnitelem Al–Co–Cu / E. V. Sukhovaya, Yu. V. Syrovatko // Adgeziya rasplavov i paika materialov. – 2014. – № 47. – S.58-65.
10. Syrovatko Yu. V. Strukturoobrazovanie kompozicionnykh materialov, uprochnennykh kvazikristallami / Yu. V. Syrovatko, E. V. Sukhovaya // Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Raketno-kosmichna tekhnika. – 2013. – T.21, № 4. – S.113-121.
11. Sukhova O. V. Metal matrix composites reinforced with Al–Co–Cu particles / O. V. Sukhova, Yu. V. Syrovatko // Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Fizika. Radioelektronika. – 2016. – T.24, № 23. – S.53-58.

Статья рекомендована к публикации д-рами техн. наук, В.И. Большаковым и Д.В. Лаухиним (Украина)

УДК 699.866

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОЖЛИВИХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЇ БАЛКОНІВ НА КІНЦЕВІ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЇХ ВЛАШТУВАННЯ

БЕРЕЗЮК А. М.<sup>1</sup>, *д.т.н., проф.*,  
ДІКАРЕВ К. Б.<sup>2\*</sup>, *к.т.н., доц.*,  
СКОКОВА А. О.<sup>3</sup>, *к.т.н., доц.*,  
КУЗЬМЕНКО О. М.<sup>4</sup>  
ЛІСНЯК Д. Ю.<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-76, e-mail: [berezuk@mail.pgasa.dp.ua](mailto:berezyuk@mail.pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0003-2113-6858

<sup>2\*</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-76, e-mail: [kdikarev@ukr.net](mailto:kdikarev@ukr.net), ORCID ID: 0000-0001-9107-3667

<sup>3</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-76, e-mail: [a.skokova@mail.ru](mailto:a.skokova@mail.ru), ORCID ID: 0000-0002-0443-0222

<sup>4</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-76, e-mail: [aleksandra\\_dnepr@mail.ru](mailto:aleksandra_dnepr@mail.ru), ORCID ID: 0000-0001-5976-5436

<sup>5</sup> Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-76, e-mail: [danillisniak@gmail.com](mailto:danillisniak@gmail.com)

**Анотація. Постановка проблеми.** На сьогоднішній день в Україні вводиться в дію все більше нормативних документів, які спрямовані на забезпечення енергоефективності об'єктів будівництва, відбувається їх гармонізація з європейськими нормами. Однак все одно нас випереджають європейські країни, які вже впроваджують стандарт пасивного і навіть активного будинку, який не тільки повністю забезпечує власні енерговитрати, а навіть реалізує державі вироблену надлишкову енергію. Традиційним рішенням для досягнення нормативного рівня теплового захисту будівель залишається ефективна зовнішня теплоізоляція. Однак, відомо, що майже кожна будівля, утеплена ззовні відповідно до чинних норм, містить теплопровідні включення, які порушують теплотехнічну однорідність ізоляційної оболонки будівлі та являють собою зону підвищених тепловитрат. Фахівцями кафедри ТБВ було розроблено варіанти влаштування енергозберігаючих конструктивно-технологічних рішень для усунення негативного ефекту теплопровідних включень в зоні балкону. Експлуатаційна ефективність цих рішень досліджена в попередніх публікаціях. Норми витрат праці на влаштування запропонованих рішень не представлені в сучасних нормативних документах в галузі будівництва. Тому спираючись на норми часу, знайдені при проведенні хронометражних досліджень виробничих процесів влаштування додаткової теплоізоляції теплопровідних включень об'єктів житлової забудови, нами було проаналізовано доцільність впровадження удосконалених варіантів влаштування додаткової теплоізоляції з технологічної та економічної точки зору, розрахувавши трудомісткість та вартість влаштування теплоізоляції балконів для 20 будівель з різними архітектурно-планувальними характеристиками. При цьому для кожної будівлі було застосовано чотири варіанти додаткової теплоізоляції та варіант зовнішньої теплоізоляції для балконів. **Аналіз досліджень:** Техніко-економічні показники (трудомісткість, вартість, тривалість) влаштування додаткової теплоізоляції армованими теплоізоляційними блоками майже не досліджені вітчизняними експертами. Тому, **метою** даної роботи є оцінка удосконалених варіантів влаштування додаткової теплоізоляції, оптимізованих за критеріями зниження трудовитрат та вартості у порівнянні із аналогічними показниками влаштування зовнішньої теплоізоляції. **Висновок:** Результати нашого дослідження свідчать про те, що застосування додаткової теплоізоляції дозволяє досягти майже ідентичного (з різницею в 1-4%) економічного ефекту у порівнянні зі стандартним влаштуванням зовнішньої теплоізоляції балконів. При цьому влаштування розроблених конструктивно-технологічних рішень коштує приблизно в 4 рази дешевше. Щодо трудомісткості, то влаштування додаткової теплоізоляції, наприклад, для об'єкту дослідження № 1 відповідає показнику 21 люд-год, в той час як влаштування зовнішньої теплоізоляції балконів цієї будівлі відповідає витратам праці у 5401 люд-год.

**Ключові слова:** теплопровідне включення, конструктивно-технологічне рішення, технологія влаштування теплоізоляції, балкон, техніко-економічні показники, енергозбереження.