

УДК 532.696:621.92

РАЗРАБОТКА СОСТАВА СПЛАВА-СВЯЗКИ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ОСНОВЕ ДЛЯ МАКРОГЕТЕРОГЕННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

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 композиционных покрытий позволяет решить проблему продления срока службы быстроизнашивающихся деталей оборудования. Для увеличения износостойкости покрытий необходима разработка состава сплава-связки на железной основе для композиционных материалов, упрочненных гранулами карбидов вольфрама. *Методика.* Макрогетерогенные композиционные материалы, упрочненные гранулами карбидов вольфрама, изготавливали методом свободной пропитки при температуре 1453 К в течение 30 минут. В качестве металлических связок использовали сплавы Fe–3%С–1,8%B–1%P и Fe–3%С–1,8%B–1%P–0,5%Mo. 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.* Установлено, что легирование сплава-связки Fe–С–В–Р молибденом позволяет уменьшить интенсивность процессов контактного взаимодействия между наполнителем и расплавленной связкой при пропитке. За счет этого подавляется выделение нежелательных хрупких фаз Fe₃W₃C и аустенита в структуре зон контактного взаимодействия. Показано, что точность определения количественных характеристик структуры можно существенно повысить благодаря использованию предложенной методики статистического анализа микрофотографий. Рассчитаны суммарные энтропии фаз в зонах контактного взаимодействия с использованием кривых распределения плотности вероятности попадания значений интенсивности отраженного от шлифа света от микроскопа в заданный интервал. *Научная новизна.* Изучены закономерности структурообразования зон контактного взаимодействия, образующихся между сплавом-наполнителем W–С и затвердевшими сплавами-связками Fe–С–В–Р и Fe–С–В–Р–Mo, в структуре композиционных материалов. Для идентификации и определения относительного содержания фаз использована оригинальная методика статистического анализа структуры. Выполнен расчет суммарной энтропии фаз в зонах контактного взаимодействия, что позволило объяснить снижение интенсивности процессов растворения гранул наполнителя в расплавленной связке Fe–С–В–Р–Mo при пропитке. *Практическая значимость.* Разработанный состав сплава-связки на железной основе для пропитки макрогетерогенных композиционных материалов, упрочненных карбидами вольфрама. Использование предложенного сплава-связки позволит повысить износостойкость композиционных материалов за счет подавления образования хрупких фаз в структуре зон контактного взаимодействия. Разработанный состав сплава-связки можно рекомендовать для получения защитных композиционных покрытий на поверхности быстроизнашивающихся деталей металлургического и машиностроительного оборудования, работающих в условиях абразивного и газо-абразивного износов.

Ключевые слова: макрогетерогенный композиционный материал; свободная пропитка; смачивание и растворение; структурообразование границ раздела, статистический анализ, энтропия фаз

РОЗРОБКА СКЛАДУ СПЛАВУ-ЗВ'ЯЗКИ НА ЗАЛІЗНІЙ ОСНОВІ ДЛЯ МАКРОГЕТЕРОГЕННИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

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

¹Кафедра 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: 0000-0000-0001-8002-0906

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 композиційних покриттів дозволяє вирішити проблему подовження терміну роботи швидкозношуваних деталей обладнання. Для підвищення зносостійкості покриттів необхідна розробка складу сплаву-зв'язки на залізній основі для композиційних матеріалів, зміцнених гранулами карбідів вольфраму. **Методика.** Макрогетерогенні композиційні матеріали, змінені гранулами карбідів вольфраму, виготовляли методом вільного просочення при температурі 1453 К протягом 30 хвилин. В якості металевої зв'язки застосовували сплави Fe–3%С–1,8%B–1%P і Fe–3%С–1,8%B–1%P–0,5%Mo. Структуру композиційних матеріалів досліджували методами металографічного, рентгеноструктурного і мікрорентгеноспектрального аналізів. Для контролю структурного і фазового состава зон контактної взаємодії, що утворюються між наповнювачем і зв'язкою при просоченні, використовували оригінальну методику статистичного аналізу структури. **Результати.** Встановлено, що легування сплаву-зв'язки Fe–C–B–P молібденом дозволяє зменшити інтенсивність процесів контактної взаємодії між наповнювачем і розплавленою зв'язкою при просоченні. За рахунок цього усувається виділення небажаних крихких фаз Fe₃W₃C і аустеніту в структурі зон контактної взаємодії. Показано, що точність визначення кількісних характеристик структури можна суттєво підвищити завдяки застосуванню запропонованої методики статистичного аналізу мікрофотографій. Розраховані сумарні ентропії фаз у зонах контактної взаємодії за допомогою кривих розподілу густини ймовірності потрапляння значень інтенсивності відбитого від шліфа світла від мікроскопу в заданий інтервал. **Наукова новизна.** Вивчені закономірності утворення зон контактної взаємодії, що утворюються між сплавом-наповнювачем W–C і затверділими сплавами-зв'язками Fe–C–B–P і Fe–C–B–P–Mo, в структурі композиційних матеріалів. Для ідентифікації і визначення відносного вмісту фаз застосовано оригінальну методику статистичного аналізу структури. Виконано розрахунок сумарної ентропії фаз у зонах контактної взаємодії, що дозволило пояснити зниження інтенсивності процесів розчинення гранул наповнювача в розплавленій зв'язці Fe–C–B–P–Mo при просоченні. **Практична значимість.** Розроблено склад сплаву-зв'язки на залізній основі для просочення макрогетерогенних композиційних матеріалів, зміцнених карбідами вольфраму. Застосування запропонованого сплаву-зв'язки дозволить підвищити зносостійкість композиційних матеріалів за рахунок усунення утворення крихких фаз у структурі зон контактної взаємодії. Розроблений склад сплаву-зв'язки може бути рекомендований для отримання захисних композиційних покриттів на поверхні швидкозношуваних деталей металургійного і машинобудівного обладнання, що працюють в умовах абразивного і газо-абразивного зносу.

Ключові слова: макрогетерогенний композиційний матеріал; пічне просочення; змочування і розчинення; утворення границь поділу, статистичний аналіз, ентропія фаз

DEVELOPMENT OF IRON-BASED BINDER COMPOSITION FOR MACROHETEROGENEOUS COMPOSITES

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. Application of composite coatings allows solving the problem of prolongation of service life of quickly-worn equipment parts. The development of iron-based binder composition for composites reinforced with tungsten carbides is imperative to enhance wear resistance of the coatings. **Methodology.** The macroheterogeneous composites reinforced with tungsten carbides were produced by infiltration at 1453 K during 30 minutes without applying pressure. The Fe–3%С–1,8%B–1%P and Fe–3%С–1,8%B–1%P–0,5%Mo alloys were used as metal binders. The structure of the composites was investigated by metallographic, X-ray, and energy dispersive X-ray analyses. To control structural and phase composition of contact interaction zones appearing between the filler and the binder during infiltration an original method of statistical structural analysis was applied. **Findings.** Alloying the Fe–C–B–P binder with molybdenum is established to allow decreasing the intensity of contact interaction processes between the filler and the molten binder during infiltration. As the result, the undesirable brittle Fe₃W₃C and austenite phases do not appear in the structure of contact interaction zones. It is shown that the accuracy of quantitative characteristics determination can be essentially improved thanks to application of the suggested statistical analysis of microphotographies. Total entropies of the contact interaction zones phases are calculated using probability density curves showing the hitting of the certain interval by the intensities of the microscope light reflected from the polished section. **Originality.** The regularities of the structure formation of the contact interaction zones appearing between the W–C filler and the solidified Fe–C–B–P or Fe–C–B–P–Mo binders were investigated. To identify and determine relative phase content the original method of statistical structural analysis was applied. Total entropies of the contact interaction zones phases were calculated which allowed explaining the decrease in dissolution rate of the filler in the molten Fe–C–B–P–Mo binder during infiltration. **Practical value.** The iron-based binder composition is developed to infiltrate macroheterogeneous composites reinforced with tungsten carbides. The application of the suggested binder allows increasing the wear resistance of the composites due to contact interaction zones being free from the brittle phases. The developed binder can be recommended to obtain composite coatings to protect quickly-worn parts of metallurgical and machine-building equipment working in abrasive and gas-abrasive media.

Keywords: macroheterogeneous composite material; furnace infiltration; wetting and dissolution; interface structure formation, statistical analysis, phase entropy

Введение

Использование композиционных покрытий с железной связкой, упрочненной карбидами вольфрама, позволяет решать проблему повышения долговечности быстроизнашивающихся деталей [1,2]. Основным недостатком таких композиционных материалов является активное взаимодействие карбидов вольфрама со связкой при относительно высокой температуре ее плавления. Это приводит к появлению в структуре зон контактного взаимодействия, образующихся на границах раздела, таких нежелательных фаз, как карбид Fe_3W_3C и аустенит [3].

Для снижения интенсивности процессов контактного взаимодействия между структурными составляющими композиционных материалов при пропитке можно использовать комплексное легирование железного сплава-связки компонентами, снижающими температуру плавления и препятствующими диффузии компонентов наполнителя в расплавленный металл [4–6]. Поэтому в данной работе проведен комплекс исследований с целью определения оптимального состава сплава-связки на железной основе для износостойких композиционных материалов, упрочненных гранулами сплавов-наполнителей W–C.

Методика

Для получения композиционных материалов предварительно изготавливали базовый сплав-связку следующего состава (по массе) Fe–3%С–1,8%B–1%P. Добавки бора и фосфора обеспечивали снижение температуры плавления и повышение микромеханических характеристик сплава Fe–C [7]. Базовый сплав-связку дополнительно легировали 0,5 % Мо, введение которого по предварительным оценкам позволяет снизить скорость растворения наполнителя в расплавленной связке. В качестве сплава-наполнителя использовали дробленый промышленный сплав W–C марки «релит». Размер гранул наполнителя составлял 0,2–2,5 мм. Макрогетерогенные композиционные материалы получали методом пропитки при температуре 1453 К в течение 30 минут.

Структуру зон контактного взаимодействия между наполнителем и связкой исследовали методами металлографического, рентгено-структурного и микрорентгеноспектрального анализов. Ширину зон контактного взаимодействия и относительное содержание фаз в их структуре определяли с помощью оригинальной методики статистического анализа [8]. Она заключалась в построении зависимостей от координаты среза интенсивности отраженного от поверхности шлифа света при исследовании на оптическом микроскопе.

После обработки полученных графиков с помощью программы сингулярного анализа числовых рядов «Гусеница» выделяли трендовые кривые, наиболее осциллирующие участки которых соответствовали зонам контактного взаимодействия [9]. Это позволяло определить их среднюю ширину с точностью до 0,1 мкм и оценить скорость растворения фаз наполнителя в расплавленной связке при пропитке. Для оценки относительного содержания фазовых и структурных составляющих в структуре зон контактного взаимодействия строили интегральные распределения плотности вероятности попадания значений интенсивности отраженного света в интервал от 0 до 1 [10–13]. После выделения из интегрального распределения гауссианы, соответствующей определенной фазе в структуре зон контактного взаимодействия, определяли площадь под этой кривой по отношению к суммарной площади под гауссианами. Полученное значение соответствовало относительному содержанию фазы.

Результаты

До пропитки базовый сплав-связка Fe–3%С–1,8%B–1%P имеет мелкодисперсную эвтектическую структуру Fe– $Fe_3(C,W)$ (рис. 1, а). Легирование базового сплава 0,5 % Мо не влияет на морфологию эвтектики, поскольку этот компонент практически не растворяется в ее фазах. В структуре дополнительно образуются кристаллы Mo_2B_5 и $Mo_2(B,C)_5$, занимающие до 5% объема сплава (рис. 2, а).

После пропитки гранул карбидов вольфрама выбранными сплавами-связками на железной основе в структуре композиционных материалов наблюдается образование зон контактного взаимодействия растворно-диффузионного типа на границах раздела между наполнителем и связкой (рис. 1, б, 2, б). Со стороны наполнителя образуется слой, в структуре которого вместо исходной эвтектики WC– W_2C наблюдаются фазы WC и Fe_3W_3C . Со стороны затвердевшей связки в эвтектике Fe–(Fe,W) $_3$ (C,W) присутствуют включения фазы Fe_3W_3C и глобулярные выделения аустенита, претерпевшего перлитный распад [14]. Метод сканирования оцифрованных снимков показывает, что в композиционных материалах со связкой, легированной молибденом, ширина зон контактного взаимодействия уменьшается в среднем в 1,18 раза. Это свидетельствует о снижении скорости растворения гранул наполнителя в связке при пропитке.

Полученные результаты можно объяснить, установив связь вероятности возникновения определенного структурно-фазового состояния с энтропией системы. Расчет энтропии выполняли с использованием кривых распределения плотности вероятности попадания значений интенсивности

отраженного от шлифа света от микроскопа в заданный интервал по формуле [15]

$$\rho(I) = \text{const} \cdot e^{S(\bar{I})/R} \quad (1)$$

где I – интенсивность отраженного света в распределении; \bar{I} – среднее значение интенсивности; $\rho(I)$ – плотность вероятности распределения; $S(I)$ – энтропия как функция интенсивности отраженного света.

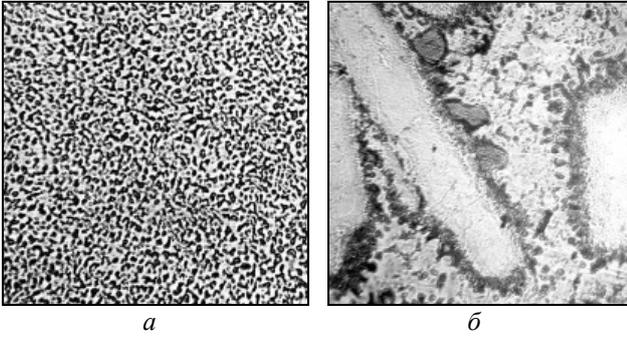


Рис. 1. Микроструктура (x100) композиционного материала со связкой Fe–C–B–P: а – исходный сплав-связка; б – армированный наполнителем W–C /
Microstructure (x100) of the Fe–C–B–P binder composites: а – initial binder; б – reinforced with W–C filler

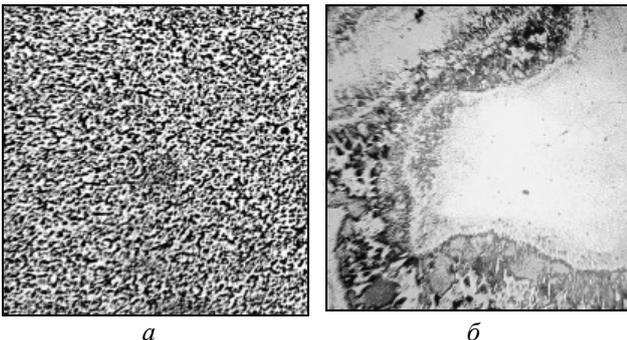


Рис. 2. Микроструктура (x100) композиционного материала со связкой Fe–C–B–P–Mo: а – исходный сплав-связка; б – армированный наполнителем W–C /
Microstructure (x100) of the Fe–C–B–P–Mo binder composites: а – initial binder; б – reinforced with W–C filler

Энтропия имеет максимальное значение, если $I = \bar{I}$, поэтому

$$\left. \frac{dS}{dI} \right|_{I=\bar{I}} = 0 \quad ; \quad \beta = \left. \frac{d^2 S}{dI^2} \right|_{I=\bar{I}} < 0. \quad (2)$$

Раскладывая $S(I)$ в ряд и ограничиваясь членом второго порядка, получим

$$S(I) = S(\bar{I}) + \frac{dS}{dI} \Delta I + \frac{1}{2} \frac{d^2 S}{dI^2} \Delta I^2 \quad ; \quad (3)$$

$$\rho(I) = \text{const} \cdot e^{S(\bar{I})/R} \cdot e^{-\frac{\beta}{2}(I-\bar{I})^2} \quad (4)$$

Экспериментальное распределение Гаусса имеет вид

$$\rho_i(I) = A_i e^{-\frac{(I-\bar{I})^2}{2\sigma_i^2}} \quad (5)$$

где A_i – амплитуда аппроксимации i -ой составляющей в суммарном распределении; σ_i^2 – квадрат дисперсии i -ой составляющей.

Сравнивая теоретическое распределение с экспериментальным, а также учитывая условие нормирования

$$\int_{-\infty}^{\infty} \rho(I) dI = 1$$

найдем коэффициенты разложения

$$A_i = \text{const} \cdot e^{S(\bar{I})/R} \quad ; \quad \beta = \frac{1}{\sigma^2} \quad (6)$$

Поскольку среднеквадратическое отклонение в нормальном распределении тождественно среднему квадрату отклонения, то

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (I-\bar{I})^2 \rho(I) dI = \frac{1}{\beta} \quad (7)$$

Тогда вероятность распределения составляющих гауссиан определяет выражение

$$\omega(I) = \frac{\text{const} \cdot L}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(I-\bar{I})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

где $\omega(I)$ – вероятность распределения.

Из условия нормирования

$$A \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(I-\bar{I})^2}{2\sigma^2}} d(I-\bar{I}) = A \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} = 1$$

находим выражение для A

$$A_i = \text{const} \cdot \frac{L_i}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} \quad (9)$$

где L_i – доля гауссианы в суммарном распределении.

Из формул (6) и (9) следует, что

$$e^{S_i(\bar{I})/R} = \frac{L_i}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} \quad (10)$$

Удалив соответствующие const из выражения (10), можно записать зависимость энтропии от величины I

$$S(I) = S(\bar{I}) - \frac{1}{2\sigma^2} (I-\bar{I})^2 = R \ln \left[\frac{L}{\sqrt{2\pi\sigma}} \right] - \frac{1}{2\sigma^2} (I-\bar{I})^2 \quad (11)$$

Выражение (11) определяет приближение второго порядка зависимости энтропии при отклонении I от среднего значения \bar{I} . График зависимости имеет вид параболы. Площадь параболы приблизительно равна суммарной энтропии той или иной фазы в структуре композиционных материалов.

Значения энтропии фаз рассчитывали по формуле

$$S_i(I) = R \int_{I_1}^{I_2} \left(\ln \frac{L_i}{\sqrt{2\pi\sigma_i}} - \frac{1}{2\sigma_i^2} (I-\bar{I})^2 \right) dI \quad (12)$$

Таблица

Значения энтропии структурных составляющих в зоне контактного взаимодействия / entropy values of structural components in the area of contact interaction

| Структурная составляющая | Связка Fe-C-B-P | | Связка Fe-C-B-P-Mo | |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|
| | Относительное содержание, % | S_i , Дж/К·моль | Относительное содержание, % | S_i , Дж/К·моль |
| Fe ₃ W ₃ C | 31,0 | 0,5455 | 5,2 | 0,6742 |
| эвт. Fe – Fe ₃ (C,B) | 58,4 | 0,8975 | 56,9 | 1,4402 |
| WC | 26,4 | 0,1117 | 10,0 | 0,0532 |

Научная новизна и практическая значимость

Установлено положительное влияние введения 0,5% молибдена в состав сплава-связки Fe-3%С-1,8%B-1%P на уменьшение интенсивности межфазного взаимодействия между структурными составляющими при пропитке композиционных материалов, упрочненных карбидами вольфрама. Оценка интенсивности взаимодействия выполнена с использованием оригинальной методики статистического анализа структуры. Закономерности формирования структурно-фазового состава зон контактного взаимодействия объяснены с учетом результатов расчета суммарной энтропии фаз.

Использование рекомендуемого состава сплава-связки для пропитки гранул карбидов вольфрама позволит повысить эксплуатационные характеристики композиционных материалов за счет подавления образования в структуре нежелательных хрупких фаз.

Выводы

1. Структура зон контактного взаимодействия между связкой и наполнителем в изученных композиционных материалах зависит от скорости растворения преимущественно эвтектической фазы W₂C наполнителя в расплавленной связке на железной основе при пропитке. Интенсивность процессов растворения можно уменьшить путем легирования сплава-связки Fe-C-B-P молибденом.

2. Расчет суммарной энтропии фаз, образующихся в зонах контактного взаимодействия, позволяет объяснить положительное влияние молибдена на снижение скорости растворения наполнителя при пропитке.

3. Использование методики статистического анализа для определения количественных характеристик структуры зон контактного взаимодействия обеспечивает повышение на порядок точности измерений по сравнению с традиционными методиками металлографического анализа.

Пределы интегрирования соответствовали точкам пересечения параболы с осью абсцисс. Как правило, они близки к интервалу 2σ .

Пользуясь графическими зависимостями (рис. 3), рассчитывали площади, отвечающие пяти выделенным гауссианам из суммарного распределения интенсивностей отраженного света. Численные значения энтропии фаз в зоне контактного взаимодействия со стороны связки приведены в таблице.

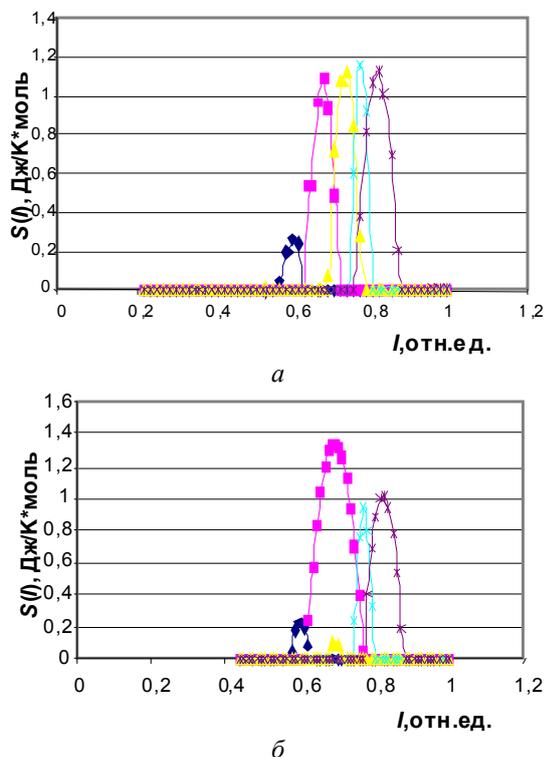


Рис. 3. Распределение суммарных энтропий в зависимости от интенсивности отраженного света для фаз в зонах контактного взаимодействия композиционных материалов со связками: а – Fe-C-B-P; б – Fe-C-B-P-Mo / Total entropy distribution depending on reflected light intensity for the phases of contact interaction zones of the composites based on the following binders: а – Fe-C-B-P; б – Fe-C-B-P-Mo

Для связки Fe-C-B-P, легированной Mo, суммарная энтропия фаз вблизи зоны контактного взаимодействия имеет более высокие значения (соотношение ~ 1,40). При удалении от границы раздела суммарная энтропия фаз затвердевшей связки также уменьшается при введении в ее состав Mo (соотношение ~ 1,11).

Расчет показывает, что для связки Fe-C-B-P свободная энергия, связанная с несбалансированной энергией напряжений, имеет более высокие значения (1,06 кДж/моль), чем для связки Fe-C-B-P-Mo, (0,74 кДж/моль).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Стабильность композиционных материалов / И. М. Спиридонова, А. Д. Панасюк, Е. В. Суховая, А. П. Уманский. – Днепропетровск: Свидлер, 2011. – 244 с.

2. Карбиды вольфрама / Г. В. Самсонов, В. К. Витрянюк, Ф. И. Чаплыгин. – К.: Наукова думка, 1974. – 175 с.
3. Sukhova, O. V. Microstructure and properties of Fe–B–C/W–C interfaces in metal matrix composites // Вісник ДУ. Фізика. Радіоелектроніка. – 2002.– № 9. – С. 15–18.
4. Суховая, Е. В. Структурный подход к созданию износостойких композиционных материалов / Е. В. Суховая // Сверхтвердые материалы. – 2013. – № 5. – С. 29–38.
5. Sukhova, O. V. High performance composites // Вісник ДУ. Фізика. Радіоелектроніка. – 2012. – № 19. – С. 78–81.
6. Сухова, О. В. Вплив механізмів структуроутворення границь поділу в композиційних матеріалах на їх властивості / О.В.Сухова // Металлофізика і новітні технології. – 2009. – Т. 31, №7. – С. 1001–1012.
7. Спиридонова, І. М. Фазові перетворення в композиційних матеріалах із залізними зв'язками, що містять бор та вуглець / І. М. Спиридонова, О. В. Сухова, О. Г. Безрукава // Доповіді НАН України. – 2002. – №10. – С. 93–97.
8. Суховая, Е. В. Процессы контактного взаимодействия в композиционных материалах с микрокристаллическим наполнителем / Е. В. Суховая, Ю. В. Сыроватко, В. А. Сыроватко // Физическая инженерия поверхности.– 2011. – Т. 9, №3. – С. 269–273.
9. Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов / Н. Э. Голяндина. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.
10. 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(62), Ч.2. – С. 86–93.
11. Башев, В. Ф. Статистический анализ микроструктуры композиционных материалов / В. Ф. Башев, Е. В. Суховая, Ю. В. Сыроватко // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сб. научн. тр. № 64 – Днепропетровск, ПГАСА, 2012. – с. 53–57.
12. Суховая, Е. В. Особенности структурообразования композиционных материалов растворно-диффузионного типа / Е. В. Суховая, Ю. В. Сыроватко // Металлофізика і новітні технології. – 2012. – Т. 33. – С. 371–378.
13. Сухова, О. В. Статистичний аналіз напружень у структурі просочених композиційних матеріалів / О. В. Сухова, Ю. В. Сыроватко // Вісник ДУ. Ракетно-космічна техніка. – 2012. – Т. 20(4). № 16(2). – С. 258–263.
14. Суховая, Е. В. Управление структурой и свойствами износостойких композиционных материалов / Е. В. Суховая, Ю. В. Сыроватко // Адгезия расплавов и пайка материалов. – 2012. – №. 45. – С. 86–93.
15. Статистическая физика / Л. Д. Ландау. – М.: Наука, 1976. – 583 с.

REFERENCES

1. Spiridonova I.M., Panasyuk A.D., Sukhovaya E.V., Umanskiy A.P. Stabilitnostj kompozitsionnykh materialov [Composites Stability]. Dnepropetrovsk, Svidler Publ., 2011. 244 p.
2. Samsonov G. V., Vytryanyuk V. K., Chaplygin F. I. Karbidy voljframa [Tungsten Carbides]. K.: Naukova dumka, 1974. 175 p.
3. Sukhova O. V. Microstructure and properties of Fe–B–C/W–C interfaces in metal matrix composites. Visnyk DU. Fyzyka. Radioelektronika – Bulletin of DU. Physics. Radioelectronics, 2002, no. 9, pp. 15–18.
4. Sukhovaya E. V. Strukturnyi podkhod k sozdaniyu iznosostoykikh kompozitsionnykh materialov [Structural approach to development of wear-resistant composites]. Sverkhverdye materialy – Superhard Materials, 2013, no. 5, pp. 29–38.
5. Sukhova O. V. High performance composites. Visnyk DU. Fyzyka. Radioelektronika – Bulletin of DU. Physics. Radioelectronics, 2012, no. 19, pp. 78–81.
6. Sukhova O. V. Vplyv mekhanizmv strukturoutvorennya granutsj podily v kompozytsiynykh materialakh na yikh vlastyvoli [Influence of structure formation mechanisms of composites interfaces on their properties]. Metallofizika i noveyshiye tekhnologii – Physics of Metals and Advanced Technologies, 2009, vol. 31, no. 7, pp. 1001–1012.
7. Spyridonova I. M., Sukhova O. V., Bezrukavaya O. G. Fazovi peretvorennya v kompozytsiynykh materialakh iz zaliznymy zv'yazkamy, shcho mistyatj bor ta vugletsj [Phase transformations of composites with iron binders containing boron and carbon]. Dopovidi NAN Ukrainy – Reports of National Academy of Science of Ukraine, 2002, no. 10, pp. 93–97.
8. Sukhovaya E. V., Syrovatko Yu. V., Syrovatko V. A. Protsessy kontaktnogo vzaimodeyctviya v kompozitsionnykh materialakh z mikrokrystallichnym napolnitelem [Contact interaction processes of composites reinforced with microcrystal filler]. Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti – Physical surface engineering, 2011, vol. 9, no. 3, pp. 269–273.
9. Golyandina N. E. Metod “Gysenitsa”-SSA: analiz vremennykh ryadov [“Gysenitsa”-SSA Method: Time Series Analysis]. Sankt-Peterburg: SPbGU, 2004. 76 p.
10. Sukhovaya E. V., Syrovatko Yu. V. Zakonomirnosti strukturoobrazovaniya mezhfaznykh granits razdela v kompozitsionnykh materialakh [Regularities in structure formation of composites interfaces]. Visnyk Skhidnoukrainskogo natsionalnogo universitetu im. V.Dalya – Bulletin of The V. Dalj East Ukrainian National University, 2011, no. 8(62), p. 2, pp. 86-93.
11. Bashev V.F., Sukhovaya E.V., Syrovatko Yu.V. Statisticheskiy analiz mikrostruktury kompozitsionnykh materialov // Building, materials sciences, mechanic engineering: Collection of scientific papers Issue № 64 – Dnipropetrovs'k, PSAES, 2012. – p. 53–57.
12. Sukhovaya E. V., Syrovatko Yu. V. Osobennosti strukturoobrazovaniya kompozitsionnykh materialov rastvorno-diffuzionnogo tipa [Peculiarities in structure formation of the composites of diffusion-dissolution type]. Metallofizika i noveyshiye tekhnologii – Physics of Metals and Advanced Technologies, 2012, vol. 33, pp. 371-378.
13. Sukhovaya E. V., Syrovatko Yu. V. Statystychy analiz napruzhenj u strukturi prosochennykh kompozitsiynykh materialiv [Statistic analysis of stresses of the infiltrated composites structure]. Visnyk DU. Raketno-kosmichna tekhnika – Bulletin of Du. Rocket-cosmos engineering, 2012, vol. 20(4), no. 16(2), pp. 258–263.
14. Sukhovaya E. V., Syrovatko Yu. V. Upravlenie strukturoy I svoystvami iznosostoykikh kompozitsionnykh materialov [Control over structure and properties of wear-resistant composites]. Adgeziya rasplavov I payka materialov – Melts Adhesion and Materials Soldering, 2012, no. 45, pp. 86–93.
15. Landau L.D. Statisticheskaya fizika [Statistical Physics]. Moscow, Science Publ., 1976. 583 p.

Статья рекомендована к публикации в журнале «Технічні науки», В.І. Большаковым и в журнале «Технічні науки», Д.В. Лаухиним (Украина)