

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.74: 669.7.018

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.014

## ФИЗИКО-ХИМИЯ РЕЦИКЛИНГА ЛИТЫХ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ

Евгений Сергеевич Прусов<sup>1</sup>, Владислав Борисович Деев<sup>2†</sup>, Артемий Витальевич Аборкин<sup>3</sup>,  
Дмитрий Владимирович Бокарёв<sup>4</sup>, Елена Михайловна Лесив<sup>5</sup>

<sup>1, 3, 4</sup> Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, ул. Горького, 87, 600000, Владимир, Россия

<sup>2</sup> Уханьский текстильный университет, ул. ФангЖи, 1, 430073, Ухань, КНР

<sup>2</sup> НИТУ «МИСиС», Ленинский проспект, 4, 119049, Москва, Россия

<sup>5</sup> Сибирский федеральный университет, пр. Свободный, 79, 660041, Красноярск, Россия

<sup>1</sup> eprusov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4189-877X>

<sup>2</sup> deev.vb@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-8349-8072>

<sup>3</sup> aborkin@vlsu.ru

<sup>4</sup> tms@vlsu.ru

<sup>5</sup> emlesiv@inbox.ru

**Аннотация.** Увеличение масштабов промышленного освоения литых алюмоматричных композитов сдерживается недостаточной проработанностью вопросов их рециклинга. Сокращение безвозвратных технологических отходов и выявление эффективных подходов к рециклингу отработанных изделий будет способствовать снижению стоимости производства продукции из литых композиционных материалов. Одним из наиболее экономически привлекательных вариантов переработки отходов производства и потребления алюмоматричных композитов является прямой переплав для повторного использования при получении отливок и слитков, однако в этом случае необходимо принимать во внимание вероятность деградации армирующей фазы. В настоящей работе рассмотрен механизм протекания физико-химических процессов взаимодействия компонентов литых алюмоматричных композитов АК12оч + 10 об.% В<sub>4</sub>С при их переработке методом прямого переплава. Экспериментально показано, что при повторных переплавах происходит увеличение доли фазы Al<sub>3</sub>BC в структуре композитов, что является следствием интенсификации межфазных реакций на границах раздела. Состав и количество продуктов взаимодействия алюминиевого расплава с карбидом бора будут зависеть от температуры процесса и продолжительности их контакта до момента кристаллизации алюмоматричного композита. Расчетным путем определено, что температура перегрева литых алюмоматричных композитов с карбидом бора при их рециклинге не должна превышать 858 °С в связи с изменением термодинамических условий взаимодействия компонентов, сопровождающимся резкой интенсификацией процесса деградации армирующих частиц.

**Ключевые слова:** литые алюмоматричные композиты, карбид бора, рециклинг, межфазное взаимодействие, структура.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10432, <https://rscf.ru/project/21-79-10432/>.

---

**Для цитирования:** Прусов Е.С., Деев В.Б., Аборкин А.В., Бокарёв Д.В., Лесив Е.М. Физико-химия рециклинга литых алюмоматричных композитов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 2. С. 258–266. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.014.

---

Original article

## PHYSICAL CHEMISTRY OF RECYCLING OF CAST ALUMINUM MATRIX COMPOSITES

Evgeniy S. Prusov<sup>1</sup>, Vladislav B. Deev<sup>2†</sup>, Artemy V. Aborkin<sup>3</sup>, Dmitry V. Bokaryov<sup>4</sup>,  
Elena M. Lesiv<sup>5</sup><sup>1,3,4</sup> Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Gorky Str., 87, Vladimir, 600000, Russia<sup>2</sup> Wuhan Textile University, FangZhi Road, 1, Wuhan, 430073, China<sup>2</sup> NUST «MISIS», Leninsky Prospekt, 4, Moscow, 119049, Russia<sup>3</sup> Siberian Federal University, Svobodny Pr., 79, Krasnoyarsk, 660041, Russia<sup>1</sup> eprusov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4189-877X><sup>2</sup> deev.vb@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-8349-8072><sup>3</sup> aborkin@vlsu.ru<sup>4</sup> tms@vlsu.ru<sup>5</sup> emlesiv@inbox.ru

**Abstract.** The increase in the scale of industrial development of cast aluminum matrix composites is constrained by the insufficient elaboration of the issues of their recycling. Reducing non-returnable technological waste and identifying effective approaches to recycling waste products will help reduce the cost of manufacturing products from cast composite materials. One of the most economically attractive options for processing waste from the production and consumption of aluminum matrix composites is direct remelting for reuse in the production of castings and ingots, however, in this case, it is necessary to take into account the possibility of degradation of the reinforcing phase. In this paper, the mechanism of the occurrence of physicochemical processes of interaction between the components of cast aluminum matrix composites AK12och + 10 vol.% B<sub>4</sub>C during their processing by direct remelting is considered. It has been experimentally shown that repeated remelting results in an increase in the proportion of the Al<sub>3</sub>BC phase in the structure of the composites, which is a consequence of the intensification of interfacial reactions at the interfaces. The composition and quantity of the products of interaction of the aluminum melt with boron carbide will depend on the process temperature and the duration of their contact until the moment of crystallization of the aluminum matrix composite. It has been calculated that the overheating temperature of cast aluminum matrix composites with boron carbide during their recycling should not exceed 858 °C due to a change in the thermodynamic conditions of interaction of the components, accompanied by a sharp intensification of the process of degradation of reinforcing particles.

**Keywords:** cast aluminum matrix composites, boron carbide, recycling, interfacial interaction, structure.

**Acknowledgements:** The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 21-79-10432, <https://rscf.ru/project/21-79-10432/>.

**For citation:** Prusov, E. S., Deev, V. B., Aborkin, A. V., Bokaryov, D. V. & Lesiv, E. M. (2021). Physical chemistry of recycling of cast aluminum matrix composites. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 2(19), 258–266. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.02.014.

## Введение

Литые композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов, представляющие собой особый класс многофункциональных материалов с армированной гетерофазной структурой, находят в последние годы возрастающее применение в различных отраслях промышленности развитых стран мира [1-3]. Активизация фундаментальных исследований по изучению механизмов формирования структуры и свойств алюмоматричных композитов в условиях литейно-металлургических процессов и сопутствующее расширение объемов работ по практическому внедрению полученных резуль-

татов в значительной степени обусловлены уникальными возможностями этих перспективных материалов. Варьируя различные сочетания матричных сплавов и армирующих компонентов, объемное содержание последних, а также их фракционный состав и морфологические характеристики, можно достичь скачкообразного прироста механических и эксплуатационных свойств, в частности, удельной прочности, твердости, жесткости, антифрикционных и демпфирующих характеристик, радиационно-защитных и других специальных свойств [4-6]. Некоторые виды литейной продукции из алюмоматричных композитов рассмотрены ранее в монографии [7]. Вместе с тем, наряду с трудно-

стями технологического характера при жидкофазном получении композиционных материалов на металлической основе [8], увеличение масштабов промышленного освоения литых алюмоматричных композитов сдерживается недостаточной проработанностью вопросов их рециклинга [9].

Сокращение безвозвратных технологических отходов и выявление эффективных подходов к рециклингу отработанных изделий будет способствовать снижению стоимости производства продукции из литых алюмоматричных композитов. Для решения этой задачи предпринимались попытки по разделению матрицы и армирующих частиц с оценкой возможной степени последующего восстановления их характеристик как индивидуальных компонентов [10-12]. Разделение матрицы и армирующей фазы требует преодоления некоторого барьера поверхностной свободной энергии по отделению частиц от матрицы. При этом сепарация компонентов композиционных материалов еще более усложняется при наличии продуктов взаимодействия на межфазных границах. По-видимому, в рамках данного подхода приемлемым вариантом может быть химическая сепарация, основанная на подборе и использовании рафинирующих реагентов, обеспечивающих снижение поверхностной свободной энергии при их контакте с армирующими частицами. При выполнении этого условия происходит разрушение адгезионных связей и отделение частиц от матрицы. Вместе с тем, стоимость получения металломатричных композитов и изделий из них, как правило, значительно выше стоимости составляющих их компонентов. В этой связи одним из наиболее экономически привлекательных вариантов переработки отходов производства и потребления алюмоматричных композитов является прямой переплав для повторного использования при получении отливок и слитков, однако в этом случае необходимо принимать во внимание вероятность деградации армирующей фазы [13]. Расчетные и экспериментальные оценки степени деградации армирующих частиц в металлургических процессах рециклинга могут составить научную основу для принятия решений о способе переработки отходов литых алюмоматричных композитов, наиболее подходящем для конкретных условий. Выявление особенностей поведения армирующих частиц и матричных материалов при рециклинге композиционных материалов жидкофазными методами позволит в перспективе сформировать практические рекомендации по переработке технологических отходов непо-

средственно на производственных участках, на которых они образуются.

Межфазные реакции между металлической матрицей и армирующей фазой играют критическую роль в обеспечении заданного уровня свойств изделий из металломатричных композитов. Понимание термодинамики и кинетики межфазных реакций является одним из ключевых факторов управления структурой и свойствами композиционных материалов. Химическая деградация армирующей фазы при продолжительном высокотемпературном контакте с матричным расплавом сопровождается образованием хрупких продуктов реакционного взаимодействия на межфазных границах и существенным изменением химического и фазового состава материала матрицы [14]. При этом возможно появление градиентов состава вблизи границ раздела, приводящих к изменению свойств материала в локальных областях. Следует отметить, что в умеренной степени реакционное взаимодействие между частицами и матрицей может способствовать повышению прочности связи на интерфейсах, однако избыточные межфазные реакции могут приводить к частичному или полному разрушению армирующего компонента [15]. Соотношение между протекающими межфазными реакциями и достигаемой прочностью связи на межфазных границах или, напротив, ее ослаблением зависит от типа рассматриваемой системы, при этом в реакцию с армирующими частицами может вступать как основа матричного сплава, так и различные легирующие элементы. Таким образом, интенсификация физико-химических процессов на межфазных границах в ходе многократных переплавов алюмоматричных композитов затрудняет их прямую переработку и требует детального анализа термодинамических и кинетических механизмов формирования структуры и фазового состава.

Целью настоящей работы являлось изучение физико-химических процессов взаимодействия компонентов литых экзогенно-армированных алюмоматричных композитов при их переработке методом прямого переплава (на примере системы Al-Si-B<sub>4</sub>C).

### Методика исследований

Для проведения экспериментов по изучению влияния повторных переплавов на межфазное взаимодействие в литых алюмоматричных композитах системы Al-Si-B<sub>4</sub>C в качестве матричного сплава использовали промышленный силумин марки АК12оч (ГОСТ 1583-93).

Армирующие компоненты представляли собой порошкообразные частицы карбида бора зернистостью F220 (основная фракция 75-63 мкм). Порошковую составляющую шихты подвергли предварительной термической обработке в течение двух часов при 700 °С для удаления поверхностных загрязнений. При этом исходили из предположения, что присутствие различных загрязнений на поверхности армирующих частиц (к примеру, адсорбированных газов, влаги и т.п.) сопровождается уменьшением их поверхностной энергии и в итоге приводит к тому, что частицы не смачиваются расплавленным алюминиевым сплавом и отторгаются. Применение термически обработанных частиц обеспечивает возможность получения литой структуры с более плотной адгезионной связью на межфазных границах. Плавку вели в алундовых тиглях емкостью до 1 кг (по алюминию) в вертикальной электрической печи сопротивления типа GRAFICARBO. Для ввода частиц карбида бора в расплав использовали замешивающее устройство с четырехлопастным импеллером из нержавеющей стали AISI 316, покрытым слоем оксида цинка. Матричный расплав перегревали до температуры 850 °С и погружали в него импеллер, вращающийся с частотой 300 об/мин. Температурные режимы плавки и разлива контролировали погружной термопарой ХА с использованием регистратора ВиЭР-104К (Россия). Армирующие частицы дозировали из расчета номинального содержания 10 об.% в композите и подавали свободной засыпкой с постоянной скоростью на лопасти вращающегося импеллера. Общее время перемешивания при получении исходного композита составляло 10 мин. По завершении ввода частиц расплав охлаждали до 750 °С, снимали шлак и разливали готовый композит в вертикальные стальные изложницы для получения слитков диаметром 20 мм и высотой 100 мм. Переплавы композитов осуществляли без использования импеллера, при этом в каждом случае перед разливкой расплав перемешивали вручную графитовым стержнем. Температурно-временные параметры плавки и разлива были одинаковыми для всех итераций переплава.

Микроструктуру образцов изучали в литом состоянии на нетравленных шлифах в режиме светлого поля с помощью инвертированного цифрового металлографического микроскопа Raztek MRX9-D (Россия), работающего под управлением программы TopView. Статистическую обработку металлографических изо-

бражений осуществляли с использованием свободно распространяемой программы ImageJ v.1.53. Эволюцию доли реакционно-индуцированных фаз оценивали с помощью методов компьютерного анализа изображений, применяя функции Threshold и Analyze Particles на предварительно обработанных восьмибитных снимках. Определяли средние размеры образующихся фаз и занимаемую ими долю площади поверхности. Для каждой итерации переплава измерения проводили на металлографических образцах, вырезанных из различных мест слитка (на расстояниях 15 мм и 40 мм от нижней торцевой части). При этом каждое приводимое значение усредняли по не менее чем пяти участкам шлифа, рассчитывая среднее арифметическое значение измеряемой величины, а также доверительные границы погрешности результатов.

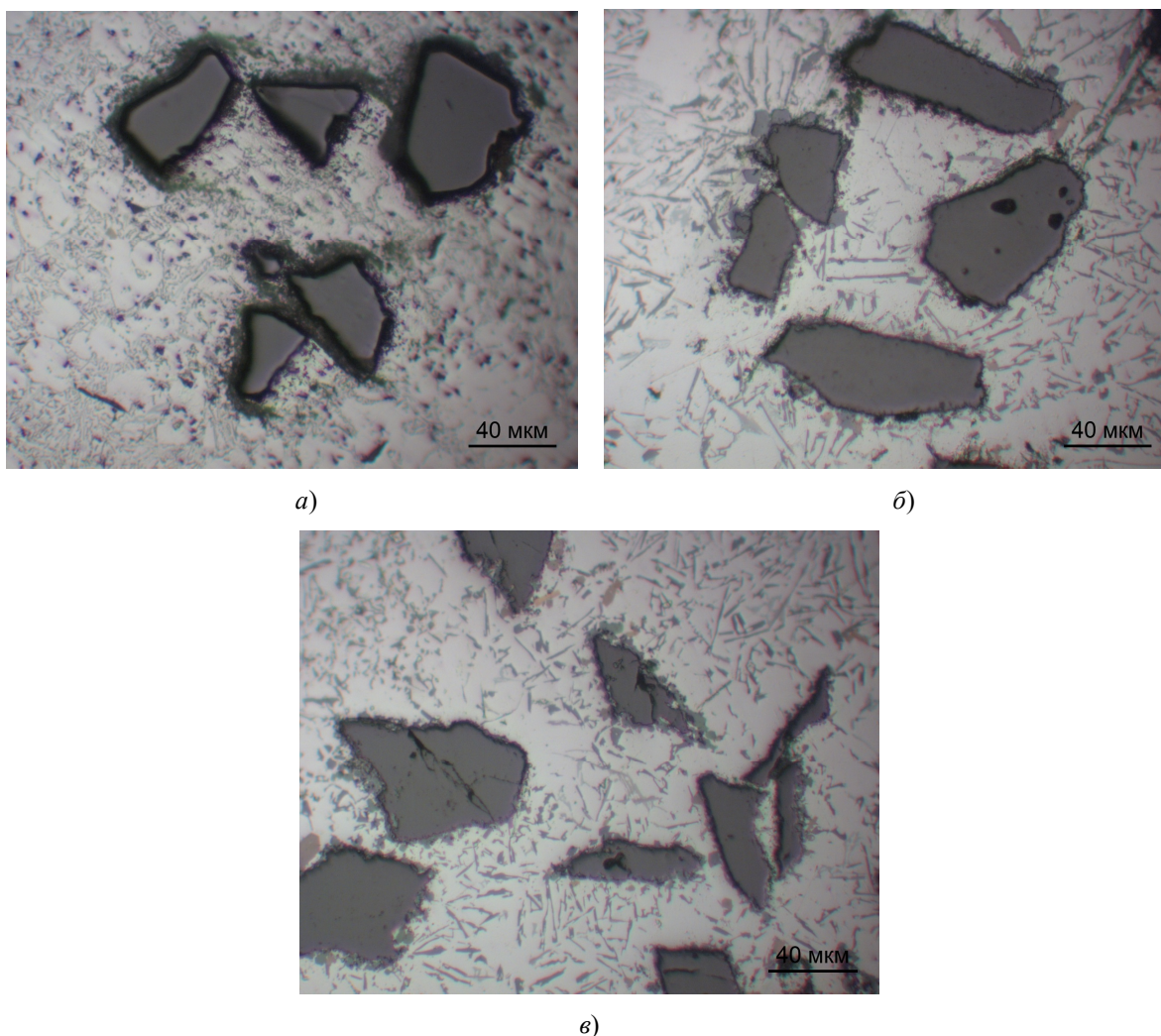
При теоретической оценке механизмов образования продуктов взаимодействия на межфазных границах использована собственная программная разработка, предназначенная для автоматизации расчетов термодинамических характеристик многокомпонентных систем [16]. Применяемое программное обеспечение разработано с использованием современных методов проектирования компьютерных программ на основе модульного и объектно-ориентированного подходов. Для создания расчетных модулей использована интегрированная среда разработки Microsoft Visual Studio (язык программирования C#). Исходными данными для выполнения расчетов в программе служат стандартные значения термодинамических характеристик реагентов, заимствуемые в соответствующих справочных изданиях и электронных базах данных по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ (Springer Materials (The Landolt-Bornstein Database), NIST Chemistry Webbook, NASA Thermo Build и др.).

## Результаты и обсуждение

Структура алюмоматричных композитов АК12 + 10 об.% В<sub>4</sub>С после различных итераций повторного переплава приведена на рис.1. Во всех случаях структура материалов представляет собой литую матрицу с характерными для сплава АК12 составляющими ( $\alpha$ -твердый раствор и эвтектика ( $\alpha + Si$ )) и распределенные в ней включения армирующих фаз. При идентификации методом оптической микроскопии структурные составляющие в литых компози-

тах  $Al-B_4C$  могут быть различены по цветам и оттенкам. В частности, частицы  $B_4C$  имеют темно-серый цвет и нерегулярную угловатую морфологию. Новая фаза вокруг частиц  $B_4C$ , имеющая светло-серый цвет и появляющаяся на снимках после второй итерации переплава, представляет собой  $Al_3BC$  [17]. Большинство частиц  $Al_3BC$  зафиксированы на поверхности частиц карбида бора или расположены рядом с ними. На второй итерации переплава не наблюдается значительных морфологических изменений частиц  $B_4C$ ; мелкие включения фазы  $Al_3BC$  располагаются только на отдельных участках

периферийной поверхности частиц. На третьей итерации распределение новой фазы вокруг частиц  $B_4C$  становится более равномерным, все наблюдаемые на шлифе частицы  $B_4C$  окружены этой фазой, при этом контуры частиц становятся размытыми, а сами частицы начинают фрагментироваться. Включения фазы  $Al_3BC$  показывают тенденцию к образованию агломератов, не отрываются от поверхности частиц при повторных переплавах, кластеризуются вблизи частиц и не распространяются вглубь матричного материала.



**Рис.1.** Репрезентативные снимки структуры литых алюмоматричных композитов АК12оч + 10 об.%  $B_4C$ , подвергнутых переплавам: а) первый переплав (исходный); б) второй переплав; в) третий переплав

**Fig.1.** Representative images of the structure of cast aluminum matrix composites АК12och + 10 vol.%  $B_4C$  subjected to remelting: а) first remelting (initial); б) second remelting; в) third remelting

Размеры включений фазы  $Al_3BC$ , определенные как усредненное значение диаметра Ферета по различным участкам шлифов из разных частей слитка, на второй и третьей итера-

циях переплава имеют очень близкие значения, составляя  $7,04 \pm 0,08$  мкм и  $6,83 \pm 0,13$  мкм, соответственно. Вместе с тем, доля площади поверхности, занимаемая фазой  $Al_3BC$ , существ-

венно увеличивается при повторных переплавах. В частности, на второй итерации переплава фаза  $Al_3BC$  занимает в среднем  $3,26 \pm 0,23$  % площади шлифа, в то время как на третьей итерации занимаемая ей доля площади увеличивается до  $7,35 \pm 0,67$  %.

Очевидно, что повышение доли фазы  $Al_3BC$  является следствием интенсификации межфазных реакций на границах раздела. Поскольку металломатричные композиты с термодинамической точки зрения представляют собой неравновесные системы, на межфазных границах «матрица – частица» возникает градиент химического потенциала. Как следствие, при благоприятных кинетических условиях активизируются диффузионные процессы и химическое взаимодействие между компонентами. Предполагая диффузионно-контролируемый рост в приближении бесконечной диффузии через плоскую границу раздела, можно записать [18]:

$$x^2 = Dt, \quad (1)$$

где  $x$  – толщина реакционной зоны,  $D$  – коэффициент диффузии,  $t$  – время.

Согласно выражению (1), количество продуктов взаимодействия на межфазной границе в системе  $Al-B_4C$  будет возрастать с увеличением продолжительности выдержки. Следовательно, объемная доля образовавшихся фаз  $Al_3BC$  будет зависеть от длительности контакта карбида бора с жидким алюминием до момента его кристаллизации. Таким образом, за счет расходования металлической фазы на образование  $Al_3BC$  будет увеличиваться эффективная объемная доля керамической армирующей фазы.

Температурная зависимость коэффициента диффузии в общем случае может быть описана уравнением Аррениуса:

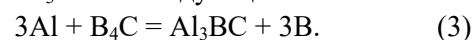
$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (2)$$

где  $D_0$  – постоянная,  $Q$  – энергия активации диффузии. Следовательно, повышение температуры сопровождается увеличением коэффициента диффузии. Это интенсифицирует реакцию между  $B_4C$  и  $Al$ , что приводит к дальнейшему снижению объемной доли  $B_4C$  и увеличению доли фазы  $Al_3BC$ .

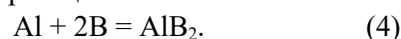
Вопрос о механизме образования фазы  $Al_3BC$  при жидкофазном получении алюмоматричных композитов системы  $Al-B_4C$  в настоящее время остается дискуссионным. В частности, было показано, что реакция между алюминием и карбидом бора может приводить к образованию различных фаз в зависимости от температуры взаимодействия [19]. Поскольку наи-

более значимым фактом при рециклинге будет оставаться сохранение соединения  $B_4C$ , протекание таких реакций следует рассматривать как нежелательное явление. Вместе с тем, продукты на границах раздела компонентов в зависимости от их природы и структурно-морфологических характеристик могут увеличивать адгезионную связь частиц с алюминиевой матрицей, поэтому рациональным решением будет поддержание контролируемого межфазного взаимодействия лишь в той степени, в которой это необходимо для достижения прочной межфазной связи.

Сделано предположение [20], что реакция между  $B_4C$  и алюминием инициирует формирование фазы  $Al_3BC$  по следующей схеме:



Учитывая пренебрежимо малую растворимость бора в алюминии, избыточные атомы бора будут образовывать бориды при взаимодействии с алюминием по реакции



В обобщенном виде уравнение реакции будет выглядеть следующим образом:



Энтальпия образования  $Al_3BC$  имеет отрицательное значение ( $-0,584$  эВ или  $-56,347$  кДж/моль), что свидетельствует о термодинамической стабильности этой фазы [21]. Данных об энтропии образования  $Al_3BC$  в доступных источниках не обнаружено, поэтому в расчетах использовали известное термодинамическое положение об аддитивности энтропии. В этом приближении энтропия образования соединения  $Al_3BC$  принята равной  $96,43$  кДж/моль. Расчеты термодинамического равновесия реакции (5) свидетельствуют о благоприятных условиях для ее протекания ( $\Delta G < 0$ ) в температурном диапазоне от  $660$  до  $858$  °С. В частности, при температуре  $750$  °С расчетное значение изменения свободной энергии Гиббса реакции (5) составляет  $-43,007$  кДж/моль. Повышение температуры до  $850$  °С приводит к уменьшению абсолютного значения изменения  $\Delta G$  до  $-1,319$  кДж/мол. Состояние термодинамического равновесия будет достигнуто при температуре  $858$  °С. При  $900$  °С изменение свободной энергии имеет положительное значение, равное  $21,194$  кДж/моль. Следовательно, при температурах выше  $858$  °С формирование  $Al_3BC$  будет происходить по другому механизму.

Экспериментально показано [22], что при температурах от  $660$  до  $868$  °С продуктами взаимодействия в системе  $Al-B_4C$  являются

$Al_3BC$  и  $AlB_2$ . Это близко к результатам проведенных термодинамических расчетов для реакции (5). По-видимому, растворение карбида бора быстро насыщает алюминиевый расплав бором и углеродом в связи с крайне низкой их растворимостью в нем. Из пересыщенного расплава на поверхности частиц  $B_4C$  зарождается фаза  $Al_3BC$ , а на примесных подложках в объеме матричного расплава возможно зарождение кристаллов  $AlB_2$ . Дальнейший рост образовавшихся фаз продолжается по механизму растворения-осаждения за счет миграции атомов углерода и бора с поверхности  $B_4C$  путем жидкофазной диффузии с последующим образованием пересыщенных растворов в алюминии и осаждением на гранях кристаллов  $Al_3BC$ . Следует отметить, что борид алюминия  $AlB_2$ , существование которого в продуктах взаимодействия прогнозируется по реакции (5), не обнаруживается на структурах, полученных в условиях проведенных экспериментов по повторным переплавам. Одной из причин этого может быть более высокая скорость нуклеации фазы  $Al_3BC$  на поверхности частиц  $B_4C$ .

При температурах выше  $868\text{ }^\circ\text{C}$  (по расчетным данным, выше  $858\text{ }^\circ\text{C}$ ) характер взаимодействия изменяется: в продуктах реакции остается  $Al_3BC$ , в то время как  $AlB_2$  заменяется тройной фазой  $Al_3B_{48}C_2$ . Очевидно, что при переходе к образованию обогащенной бором фазы  $Al_3B_{48}C_2$  расходование исходной фазы  $B_4C$  значительно увеличится, что приведет к быстрой деградации армирующих частиц. Таким образом, варьирование температурно-временных параметров жидкофазной переработки литых алюмоматричных композитов является одним из ключевых факторов управления межфазными реакциями для минимизации деградации армирующей фазы при одновременном обеспечении необходимого уровня адгезионных связей на границах раздела «матрица-частица» и равномерного распределения частиц в объеме расплава. Сокращение продолжительности высокотемпературного контакта армирующих частиц с матричным расплавом будет способствовать уменьшению объемной доли продуктов взаимодействия на межфазных границах. Наряду с этим, среди эффективных вариантов решения проблемы деградации частиц в процессах рециклинга алюмоматричных композитов следует выделить подбор и использование дополнительных легирующих элементов, меняющих состав межфазных слоев для формирования диффузионных барьеров, препятствующих химическому взаимодействию частиц с материалом матрицы.

## Выводы

С использованием термодинамического анализа и количественных методов компьютерной металлографии рассмотрен механизм протекания физико-химических процессов взаимодействия компонентов литых алюмоматричных композитов АК12оч + 10 об.%  $B_4C$  при их переработке методом прямого переплава. Экспериментально показано, что при повторных переплавах происходит увеличение доли фазы  $Al_3BC$  в структуре композитов, что является следствием интенсификации межфазных реакций на границах раздела. Состав и количество продуктов взаимодействия алюминиевого расплава с карбидом бора будут зависеть от температуры процесса и продолжительности их контакта до момента кристаллизации алюмоматричного композита. Расчетным путем определено, что температура перегрева литых алюмоматричных композитов с карбидом бора при их рециклинге не должна превышать  $858\text{ }^\circ\text{C}$  в связи с изменением термодинамических условий взаимодействия компонентов, сопровождающимся резкой интенсификацией процесса деградации армирующих частиц.

## Список литературы

1. Miracle D.B. Metal matrix composites – from science to technological significance // *Composites Science and Technology*. 2005. V. 65, Iss. 15–16. P. 2526–2540.
2. Ajay Kumar P., Rohatgi P., Weiss D. 50 Years of Foundry-Produced Metal Matrix Composites and Future Opportunities // *International Journal of Metalcasting*. 2020. V. 14. P. 291–317.
3. Reddy P.V., Kumar G.S., Krishnudu D.M., Rao H.R. Mechanical and Wear Performances of Aluminium-Based Metal Matrix Composites: A Review // *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*. 2020. V. 6. Article No. 83.
4. Sangeethkumar E., Jaikumar M., Sridath K.M.N., Ramanathan V., Sathyamurthy R. Tribological study on hybrid metal matrix composites for application in automotive sector // *Materials Research Express*. 2019. V. 6, N 5. Article No. 055703.
5. Das D.K., Mishra P.C., Singh S., Thakur R.K. Properties of ceramic-reinforced aluminium matrix composites – a review // *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*. 2014. V. 9. Article No. 12.
6. Kumar D., Angra S., Singh S. Mechanical Properties and Wear Behaviour of Stir Cast Aluminium Metal Matrix Composite // *A Review*. In-

ternational Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2022. V. 35, Iss. 4. P. 794–801.

7. Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А. *Металлургия алюмоматричных композиционных сплавов*. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2017. 192 с.

8. Aynalem G.F. Processing Methods and Mechanical Properties of Aluminium Matrix Composites // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. Article ID 3765791. P. 1–19.

9. Прусов Е.С. Развитие принципов рециклинга литых металломатричных композитов // *Литейщик России*. 2018. № 11. С. 23–27.

10. Nishida Y., Izawa N., Kuramasu Y. Recycling of aluminum matrix composites // *Metallurgical and Materials Transactions A*. V. 30A. 1999. P. 839–844.

11. Nishida Y. Recycling of metal matrix composites // *Advanced Engineering Materials*. 2001. V. 5, Iss. 3. P. 315–317.

12. Ravi K.R., Pillai R.M., Pai B.C., Chakraborty M. Separation of matrix alloy and reinforcement from aluminum metal matrix composites scrap by salt flux addition // *Bulletin of Materials Science*. 2007. V. 30, N 4. P. 393–398.

13. Prusov E., Panfilov A. Influence of repeated remeltings on formation of structure of castings from aluminum matrix composite alloys. METAL 2013 – 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. 2013. P. 1152–1156.

14. Carotenuto G., Gallo A., Nicolais L. Degradation of SiC particles in aluminium-based composites // *Journal of Materials Science*. 1994. V. 29. P. 4967–4974.

15. Braszczyńska-Malik K.N. Types of Component Interfaces in Metal Matrix Composites on the Example of Magnesium Matrix Composites // *Materials*. 2021. V. 14. Article No. 5182.

16. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2016615367, Расчет термодинамических характеристик металлургических реакций / Прусов Е.С., Тюленев Н.Ю. Заявка №2016612861 от 30.03.2016. Оpubл. 23.05.2016.

17. Kouzeli M., San Marchi C., Mortensen A. Effect of reaction on the tensile behavior of infiltrated boron carbide–aluminum composites // *Materials Science and Engineering A*. 2002. V. 337. P. 264–273.

18. Chawla K.K. *Composite Materials*. 3rd ed. Springer, New York, 2012. 542 p.

19. Lin Q., Shen P., Qiu F., Zhang D., Jiang Q. Wetting of polycrystalline B<sub>4</sub>C by molten Al at 1173 and 1473K // *Scripta Materialia*. 2009. V. 60. P. 960–963.

20. Pyzik A.J., Beaman D.R. Al-B-C Phase development and effects on mechanical properties of B<sub>4</sub>C/Al-derived composites // *Journal of the American Ceramic Society*. 1995. V. 78, N 2. P. 305–312.

21. Hu Q., Guo W., Xiao P., Yao J. First-principles investigation of mechanical, electronic, dynamical, and thermodynamic properties of Al<sub>3</sub>BC // *Physica B: Physics of Condensed Matter*. 2021. V. 616. Article No. 413127.

22. Viala J.C., Bouix J., Gonzalez G., Esnouf C. Chemical reactivity of aluminium with boron carbide // *Journal of Materials Science*. 1997. V. 32. P. 4559–4573.

### Информация об авторах

*Е. С. Прусов – кандидат технических наук, доцент Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.*

*В. Б. Деев – доктор технических наук, профессор Уханьского текстильного университета, профессор НИТУ «МИСиС».*

*А. В. Аборкин – кандидат технических наук, доцент Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.*

*Д. В. Бокарев – инженер Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.*

*Е. М. Лесив – кандидат технических наук, доцент Сибирского федерального университета.*

### References

1. Miracle, D. B. (2005). Metal matrix composites – from science to technological significance. *Composites Science and Technology*, 15–16(65), 2526–2540.

2. Ajay Kumar, P., Rohatgi, P. & Weiss, D. (2020). 50 Years of Foundry-Produced Metal Matrix Composites and Future Opportunities. *International Journal of Metalcasting*, 14, 291–317.

3. Reddy, P. V., Kumar, G. S., Krishnudu, D. M. & Rao, H. R. (2020). Mechanical and Wear Performances of Aluminium-Based Metal Matrix Composites: A Review. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 6, 83.

4. Sangeethkumar, E., Jaikumar, M., Sridath, K. M. N., Ramanathan, V. & Sathyamurthy, R. (2019). Tribological study on hybrid metal matrix composites for application in automotive sector. *Materials Research Express*, 5(6), 055703.



5. Das, D. K., Mishra, P. C., Singh, S. & Thakur, R. K. (2014). Properties of ceramic-reinforced aluminium matrix composites – a review. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 9, 12.
6. Kumar, D., Angra, S. & Singh, S. (2022). Mechanical Properties and Wear Behaviour of Stir Cast Aluminum Metal Matrix Composite. A Review. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 4(35), 794–801.
7. Panfilov, A. A., Prusov, E. S. & Kechin, V. A. (2017). Metallurgiya alyumomatrichnykh kompozitsionnykh splavov. Vladimir: Izd-vo VIGU. P. 192. (In Russ.).
8. Aynalem, G. F. (2020). Processing Methods and Mechanical Properties of Aluminium Matrix Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, 3765791, 1–19.
9. Prusov, E. S. (2018). Razvitiye printsipov retsiklinga litykh metallomatrichnykh kompozitov. *Liteyshchik Rossii*, 11, 23–27. (In Russ.).
10. Nishida, Y., Izawa, N. & Kuramasu, Y. (1999). Recycling of aluminum matrix composites. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30A, 839–844.
11. Nishida, Y. (2001). Recycling of metal matrix composites. *Advanced Engineering Materials*, 3(5), 315–317.
12. Ravi, K. R., Pillai, R. M., Pai, B. C. & Chakraborty, M. (2007). Separation of matrix alloy and reinforcement from aluminum metal matrix composites scrap by salt flux addition. *Bulletin of Materials Science*, 4(30), 393–398.
13. Prusov, E. & Panfilov, A. (2013). Influence of repeated remeltings on formation of structure of castings from aluminum matrix composite alloys. *METAL 2013 – 22nd International Conference on Metallurgy and Materials*, Conference Proceedings, 1152–1156.
14. Carotenuto, G., Gallo, A. & Nicolais, L. (1994). Degradation of SiC particles in aluminium-based composites. *Journal of Materials Science*, 29, 4967–4974.
15. Braszczynska-Malik, K. N. (2021). Types of Component Interfaces in Metal Matrix Composites on the Example of Magnesium Matrix Composites. *Materials*, 14, 5182.
16. Svidetel'stvo o registratsii programmy dlya EVM RU 2016615367, Raschet termodinamicheskikh kharakteristik metallurgicheskikh reaktsiy / Prusov E.S., Tyulenev N.Yu. Zayavka N 2016612861 ot 30.03.2016. Opubl. 23.05.2016. (In Russ.).
17. Kouzeli, M., San Marchi, C. & Mortensen, A. (2002). Effect of reaction on the tensile behavior of infiltrated boron carbide–aluminum composites. *Materials Science and Engineering A*, 337, 264–273.
18. Chawla, K. K. (2012). *Composite Materials*. 3rd ed. Springer, New York. P. 542.
19. Lin, Q., Shen, P., Qiu, F., Zhang, D. & Jiang, Q. (2009). Wetting of polycrystalline B<sub>4</sub>C by molten Al at 1173 and 1473K. *Scripta Materialia*, 60, 960–963.
20. Pyzik, A. J. & Beaman, D. R. (1995). Al-B-C Phase development and effects on mechanical properties of B<sub>4</sub>C/Al-derived composites. *Journal of the American Ceramic Society*, 2(78), 305–312.
21. Hu, Q., Guo, W., Xiao, P. & Yao, J. (2021). First-principles investigation of mechanical, electronic, dynamical, and thermodynamic properties of Al<sub>3</sub>BC. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 616, 413127.
22. Viala, J. C., Bouix, J., Gonzalez, G. & Esnouf, C. (1997). Chemical reactivity of aluminium with boron carbide. *Journal of Materials Science*, 32, 4559–4573.

#### Information about the authors

*E. S. Prusov – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.*

*V. B. Deev – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Wuhan Textile University, Professor of the NUST «MISIS».*

*A. V. Aborkin – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.*

*D. V. Bokaryov – Engineer the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.*

*E. M. Lesiv – Candidate of Technical Sciences, Assistant professor of the Siberian Federal University*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 25.04.2022; одобрена после рецензирования 02.05.2022; принята к публикации 10.05.2022.

The article was received by the editorial board on 25 Apr. 22; approved after reviewing on 02 May. 22; accepted for publication on 10 May.22.