




Научная статья
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)
УДК621.74:669.018.9

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.033

 EDN: OXDFNJ

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЭКЗОГЕННОЙ ФАЗЫ

Евгений Сергеевич Прусов ¹, Иван Владимирович Шабалдин ²,
Владислав Борисович Деев ³

^{1, 2, 3} Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, г. Владимир, Россия

³ Уханьский текстильный университет, г. Ухань, Китай

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

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

² shabaldinivan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1958-6852>

³ deev.vb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8349-8072>

Аннотация. Актуальной задачей в области разработки и совершенствования металлургических технологий получения алюмоматричных композиционных материалов является поиск технических и технологических решений, позволяющих повысить степень усвоения армирующих частиц матричным алюминиевым расплавом для увеличения их предельных концентраций при одновременном обеспечении стабильного качества получаемых материалов. В статье изложены основные результаты отработки технологических приёмов механического замешивания порошкообразных частиц карбида кремния (63–75 мкм) в алюминиевый расплав при номинальном содержании армирующей фазы 25 об.%. Показано, что синтезированные материалы характеризуются равномерным распределением армирующих частиц и отличаются повышенными показателями прочности на сжатие и износостойкости в условиях сухого трения.

Ключевые слова: литые композиционные материалы, экзогенное армирование, карбид кремния, механическое замешивание, структура и свойства.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности / машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение № 075-15-2021-692 от 5 августа 2021 года).

Для цитирования: Прусов Е. С., Шабалдин И. В., Деев В. Б. Формирование структуры и свойств литых композиционных материалов с повышенным содержанием экзогенной фазы // Ползуновский вестник. 2023. № 4, С. 257–263. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.033. EDN: <https://elibrary.ru/OXDFNJ>.

Original article

FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CAST COMPOSITE MATERIALS WITH INCREASED EXOGENOUS PHASE CONTENT

Evgeny S. Prusov ¹, Ivan V. Shabaldin ², Vladislav B. Deev ³

© Прусов Е. С., Шабалдин И. В., Деев В. Б., 2023

^{1,2,3} Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

³ Wuhan Textile University, Wuhan, China

³ National University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russia

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

² shabaldinivan@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1958-6852>

³ deev.vb@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8349-8072>

Abstract. *An urgent task in the field of development and improvement of metallurgical technologies for producing aluminum matrix composite materials is the search for technical and technological solutions that make it possible to increase the degree of assimilation of reinforcing particles by the matrix aluminum melt to increase their maximum concentrations while simultaneously ensuring stable quality of the resulting materials. The article presents the main results of developing technological methods for mechanical mixing of powdered particles of silicon carbide (63-75 microns) into an aluminum melt with a nominal content of the reinforcing phase of 25 vol.%. It has been shown that the synthesized materials are characterized by a uniform distribution of reinforcing particles and are distinguished by increased compressive strength and wear resistance under dry friction conditions.*

Keywords: *cast composite materials, exogenous reinforcement, silicon carbide, mechanical stirring, structure and properties.*

Acknowledgements: *The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2020-0015, state assignment of VISU). The study was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary center for the collective usage of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (Agreement No. 075-15-2021-692 of August 5, 2021).*

For citation: Prusov, E. S., Shabaldin, I. V. & Deev, V. B. (2023). Formation of the structure and properties of cast composite materials with increased exogenous phase content. *Polzunovskiy vestnik*, (4), 257-263. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.04.033. EDN: <https://elibrary.ru/OXDFNJ>.

ВВЕДЕНИЕ

Литые композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов перспективны для использования в качестве альтернативы многим традиционным сплавам при изготовлении отливок ответственного назначения различной номенклатуры [1–3]. Это обусловлено, в частности, возможностью значительного повышения прочности на сжатие, твердости, износо- и задиристости, демпфирующей способности и других механических и эксплуатационных свойств материалов при армировании частицами высокомолекулярных тугоплавких соединений [4–6]. Варьирование объемного содержания, дисперсности, морфологии, пространственного распределения армирующих компонентов в матричном материале, а также химического состава матрицы по содержанию легирующих элементов открывает широкие потенциальные возможности для управления структурой литых композиционных материалов и достижения заданного уровня их свойств и функциональных характеристик.

Наиболее широко применяемым металлургическим методом получения алюмоматричных композиционных материалов с экзо-

генными армирующими фазами в настоящее время остается механическое замешивание порошкообразных частиц в матричный расплав с помощью вращающегося импеллера [7, 8]. Этот метод, отличаясь универсальностью и сравнительной простотой технической реализации, достаточно легко адаптируется к промышленным условиям. Вместе с тем, в целях обеспечения требуемой степени усвоения частиц алюминиевым расплавом и минимизации дефектов литой структуры необходимо для различных комбинаций «матрица – армирующая фаза» экспериментально подбирать рациональные конструктивные и технологические параметры механического замешивания [9–12]. В особенности это касается процессов получения алюмоматричных композиционных материалов с высоким содержанием экзогенной армирующей фазы в условиях гравитационного литья.

Несмотря на то, что современные технологические подходы к получению литых композиционных материалов в условиях металлургических процессов позволяют устранить или существенно снизить многие проблемы, связанные с равномерностью распределения армирующих материалов, агло-

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЭКЗОГЕННОЙ ФАЗЫ

мерацией, смачиваемостью экзогенных частиц и образованием нежелательных фаз [13], вопросы повышения предельных концентраций армирующих компонентов проработаны в недостаточной степени. Следует подчеркнуть, что для обеспечения усвоения керамических частиц расплавом важное значение имеет их подача с заданной равномерной скоростью, поэтому получение литых металломатричных композитов с высокой объемной долей армирующей фазы в процессах механического замешивания неизбежно связано с необходимостью значительного увеличения продолжительности замешивания. При этом в некоторый момент времени отмечается, что продолжение подачи порошка в зону механического перемешивания расплава не приводит к дальнейшему увеличению содержания армирующей фазы в композиции. Обозначенные обстоятельства обуславливают необходимость дальнейшего поиска рациональных технологических решений по получению литых композиционных материалов с повышенным содержанием экзогенных керамических фаз в условиях литейно-металлургических процессов.

В связи с изложенным, целью работы является отработка технологических приёмов механического замешивания порошкообразных частиц карбида кремния в алюминиевый расплав для обеспечения повышенной степени усвоения армирующей фазы при номинальном содержании 25 об.% и изучение структуры и свойств полученных композиционных материалов.

МЕТОДЫ

В проведенных сериях экспериментов были отработаны температурно-временные параметры замешивания частиц карбида кремния 63С F220 (основная фракция 75–63 мкм) в нелегированный алюминий А 99 исходя из их номинального содержания 25 об.%. Плавку проводили в алуновом тиглях емкостью до 1 кг (по алюминию) в вертикальной электрической печи сопротивления типа GRAFICARBO (Италия). Для улучшения смачиваемости частиц расплавом перед замешиванием вводили технологическую добавку магния Mg 90 в количестве 2,5 масс.%. Замешивание проводили с помощью четырехлопастного импеллера из нержавеющей стали AISI 316 с нанесенным на него покрытием BN при температуре расплава 850 °С и частоте вращения импеллера 300 об/мин, при этом скорость подачи частиц SiC оставалась неизменной на протяжении всего цикла замешивания (0,04–0,06 г/с). Указанные режи-

мы ранее были отработаны при получении металломатричных композитов с 10 об.% экзогенной фазы [13]. Вместе с тем, с учетом существенных изменений вязкости композиционного расплава после ввода примерно половины от общей навески порошковой составляющей шихты частоту вращения импеллера увеличивали до 400 об/мин и поднимали температуру расплава до 900 °С. По завершении ввода всей навески частиц с поверхности расплава снимали шлак и разливали полученную композиционную суспензию при температуре 750 °С в вертикальную стальную изложницу для получения слитков диаметром 20 мм и высотой 100 мм.

По результатам экспериментов было показано, что при получении литых алюмоматричных композиционных материалов с повышенным содержанием SiC важное значение имеет управление температурным режимом процесса, поскольку продолжительное механическое перемешивание расплава сопровождается сильным падением его температуры. Таким образом, технологический процесс получения композитов с содержанием армирующих частиц 20–25 об.% должен предусматривать гибкое регулирование частоты вращения импеллера и температуры расплава в отличие от процесса получения композиционных материалов, содержащих 10–15 об.%, который реализуется при фиксированных технологических параметрах. По завершении ввода порошковой составляющей шихты механическое перемешивание расплава необходимо продолжать в течение 2–3 мин с одновременным вертикальным возвратно-поступательным перемещением импеллера по высоте тигля для устранения возможной структурной неоднородности.

Структуру полученных материалов изучали на нетравленных шлифах с помощью металлографического микроскопа Альтами МЕТ 1Т (Россия) в комплекте с цифровой камерой Ximea MQ013CG-E2. Фазовый анализ образцов в литом состоянии проводили на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker AXS, Германия) в CuK α -излучении с длиной волны 1,5406 Å при скорости вращения гониометра 4 град/мин с шагом 0,05° (2 θ) по методу Брэгга–Брентано. Идентификацию фаз осуществляли в программном комплексе DiffraC.Suite на основе базы данных Crystallography Open Database.

Твердость была измерена по методу Роквелла на шлифованных образцах на стационарном твердомере ИТР-60/150А (ООО «Метротест», г. Нефтекамск). Для определения предела прочности образцов проводились

испытания на сжатие при помощи универсальной испытательной машины WDW-100E (Time Group Inc., Китай). Сжатие образцов проводилось при комнатной температуре со скоростью движения траверсы 5 мм/мин. Для измерения электропроводности использовали вихретоковый измеритель ВЭ-27НЦ (ООО НПП «Сигма», г. Екатеринбург). Испытания на износостойкость проводились при помощи трибометра TRB (CSM Instruments, Швейцария), используя стальной шарик 6 мм в условиях сухого трения при комнатной температуре. Линейная скорость составляла 20 см/с при нагрузке 10 Н, длина пути трения – 300 м, радиус – 5 мм. Оценку износостойкости проводили по изменению массы образца до и после испытаний с точностью $\pm 10^{-4}$ г. После трибологических испытаний измеряли глубину трека износа при помощи профилометра

SJ-201 (Mitutoyo, Япония).

Статистическая обработка экспериментальных данных и визуализация результатов проводились с использованием встроенных средств программных пакетов Origin Pro и Microsoft Excel. При исследовании свойств и характеристик литых композиционных материалов в ходе прямых измерений для каждой серии опытов вычисляли среднее арифметическое полученных значений измеряемой величины, а также доверительные границы погрешности результатов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице 1 указан фактический усредненный химический состав полученного композиционного материала, определенный при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра Olympus Vanta C.

Таблица 1 – Усредненный химический состав композиционного материала Al + 25 об.% SiC, масс.%

Table 1 – Average chemical composition of Al + 25 vol.% SiC composite material, wt.%

Al	Si	Mg	Fe	Cr	Ni	V	Cu	Ti	Zn
70,40	26,46	2,54	0,316	0,097	0,078	0,038	0,036	0,028	0,004

На рисунке 2 представлена характерная микроструктура образца синтезированного композиционного материала в литом состоянии из центральной нижней части слитка на расстоянии 15 мм от торца. Был проведен количественный металлографический анализ снимков с использованием оригинального программного обеспечения [14] по методике, изложенной ранее в работе [15]. Анализ проводили на четырех произвольно выбранных участках шлифа с последующей статистической обработкой. Результаты анализа представлены в таблице 2. Используемый показатель равномерности распределения частиц может принимать значения от 0 до 1, где нулевое значение признается совершенно однородным распределением, а значение 1 соответствует крайне неравномерному (кластеризованному) распределению. Полученные результаты свидетельствуют об однородном распределении частиц. Количественный фазовый состав материала и кристаллогеометрические параметры идентифицированных фаз приведены в таблице 3.

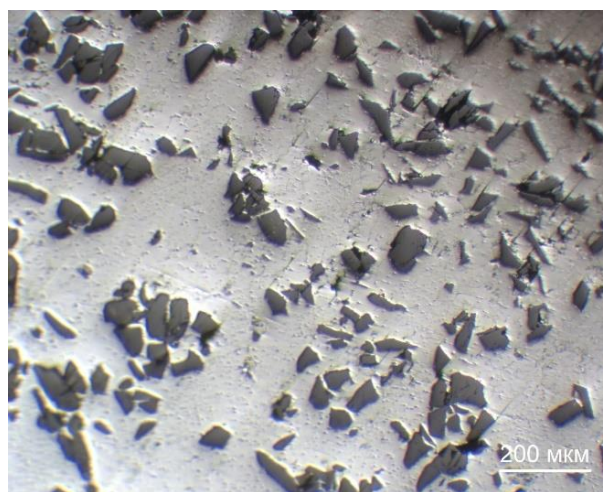


Рисунок 1 – Характерная микроструктура литого композиционного материала Al + 25 об.% SiC

Figure 1 – Characteristic microstructure of cast Al+ 25 vol.% SiC composite material

Таблица 2 – Результаты количественного металлографического анализа структуры литого композиционного материала Al + 25 об.% SiC

Table 2 – Results of quantitative metallographic analysis of the structure of cast Al + 25 vol.% SiC composite

Кол-во частиц	Площадь, занимаемая частицами, %	Средняя площадь, занимаемая частицей, мкм	Средний размер частицы, мкм	Равномерность распределения

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЭКЗОГЕННОЙ ФАЗЫ

141	17,689	1729,525	63,205	0,47
-----	--------	----------	--------	------

Таблица 3 – Количественный фазовый состав материала и кристаллогеометрические параметры идентифицированных фаз

Table 3 – Quantitative phase composition of the material and crystal geometric parameters of the identified phases

Фаза	Количество, %	Пространственная группа	Параметры решетки		
			тип	a, нм	c, нм
α-Al	75,84	<i>Fm$\bar{3}m$</i>	куб.	4,0413	–
SiC	24,16	<i>F$\bar{4}3m$</i>	куб.	4,3480	–

По данным рентгеновского дифракционного анализа (рис. 2, табл. 3), полученный композиционный материал имеет двухфазную структуру, состоящую из α-твердого раствора магния в алюминии (COD 9012428) и фазы SiC (COD 9008856). При этом не обнаружено каких-либо промежуточных соединений, указывающих на химическое взаимодействие карбида кремния с алюминиевым расплавом.

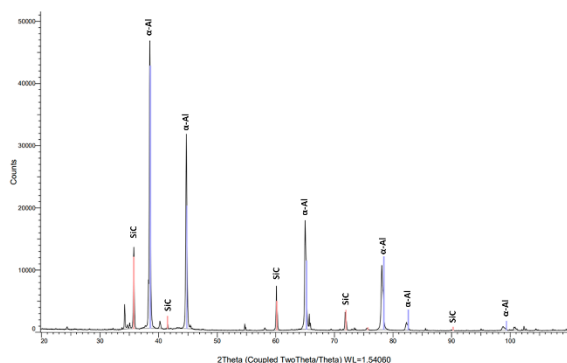


Рисунок 2 – Дифрактограмма композиционного материала Al + 25об.% SiC

Figure 2 – XRD pattern of Al + 25 vol.% SiC composite material

Проведены испытания на сжатие, используя три образца синтезированного материала диаметром 6 мм и высотой 11 мм, вырезанных из различных частей слитка. На рисунке 3 приведены результаты эксперимента, отображающие зависимость деформации от напряжения для испытанных образцов. Полученные зависимости имеют качественно схожий характер для всех образцов при небольшом разбросе значений условного предела текучести.

По результатам трибологических испытаний в условиях сухого трения скольжения было установлено, что средний коэффициент трения равен ~0,42, при этом массовый износ составил 0,0028 г. Полученные данные свидетельствуют о высокой износостойкости синтезированного материала. В частности, при близких значениях коэффициента трения износостойкость значительно выше, чем в аналогичных условиях испытаний у литого композита АК12 + 10 об.% В₄С [16]. На рисун-

ке 4 приведена зависимость коэффициента трения синтезированного композиционного материала Al + 25 об.% SiC от пройденного расстояния контртела.

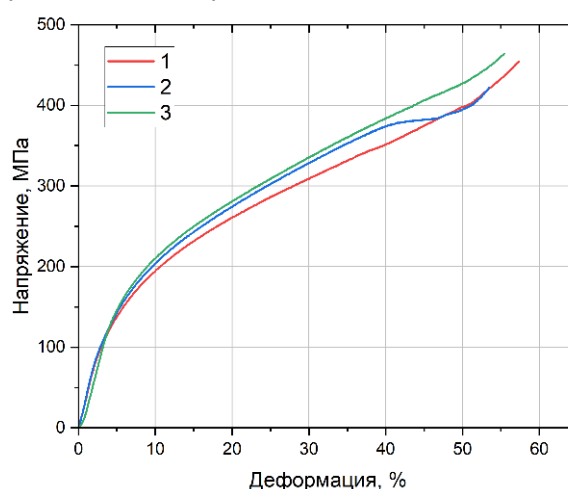


Рисунок 3 – Результаты испытаний на сжатие композиционного материала Al + 25 об.% SiC

Figure 3 – Compression test results of Al + 25 vol.% SiC composite material

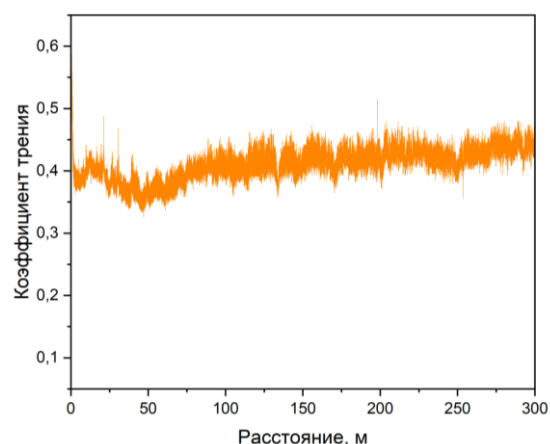


Рисунок 4 – График изменения коэффициента трения образца композиционного материала Al + 25 об.% SiC в зависимости от пути трения

Figure 4 – Graph of the coefficient of friction of the composite material sample Al + 25 vol.% SiC depending on the friction distance

В таблице 4 приведены сводные данные о физико-механических и трибологических

свойствах полученного композиционного материала.

Таблица 4 – Свойства полученного композиционного материала Al + 25 об.% SiC

Table 4 – Properties of the obtained composite material Al + 25 vol.% SiC

Свойство	Значение
Электропроводность, МСм/м	12,2 ± 0,1
Твердость HRB	43,5 ± 4,4
Условный предел текучести, МПа	399 ± 35
Коэффициент трения	0,41851 ± 0,00077
Массовый износ, г	0,0028 ± 0,0001

В целом полученные результаты подтверждают эффективность отработанных технологических решений по получению литых композиционных материалов с повышенным содержанием экзогенной керамической фазы (до 25 об.%), обеспечивающих минимизацию безвозвратных потерь порошковой составляющей шихты в процессе механического замешивания и стабильное качество синтезируемых алюмоматричных композитов. При этом возможно их использование не только в качестве перспективного функционального материала, отличающегося повышенными показателями износостойкости и прочности на сжатие, но и как концентрированной композиционной лигатуры, позволяющей получать литые алюмоматричные композиты заданного состава без применения специального замешивающего оборудования. Перспективы дальнейшего развития разработанных решений могут быть связаны с поиском рациональных технологических вариантов замешивания в расплавы частиц более мелких фракций (1–10 мкм) в количестве 25–30 об.%.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты позволяют рекомендовать отработанные регулируемые температурно-скоростные параметры механического замешивания для получения литых композиционных материалов с повышенным содержанием экзогенной армирующей фазы. Предлагаемые решения обеспечивают равномерное распределение армирующих частиц в объеме расплава при стабильном качестве получаемых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miracle D.B. Metal matrix composites – From science to technological significance. Composites Science and Technology. 2005. Vol. 65. P. 2526–2540. DOI : 10.1016/J.COMPOSITECH.2005.05.027.
2. Mortensen A., Llorca J. Metal Matrix Composites.

Annual Review of Materials Research. 2010, Vol. 40. P. 243–270. DOI : 10.1146/ANNUREV-MATSCI-070909-104511.

3. Garg P., Jamwal A., Kumar D., Sadasivuni K.K., Hussain C.M., Gupta P. Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications. Journal of Materials Research and Technology. 2019. Vol. 8. Iss. 5. P. 4924–4939. DOI : 10.1016/J.JMRT.2019.06.028.

4. Prusov E.S., Panfilov A.A. Properties of cast aluminum-based composite alloys reinforced by endogenous and exogenous phases. Russian Metallurgy (Metally). 2011. № 7. P. 670–674. DOI : 10.1134/S0036029511070123.

5. Kala H., Mer K.K.S., Kumar S. A review on mechanical and tribological behaviors of stir cast aluminum matrix composites. Procedia Materials Science. 2014. Vol. 6. P. 1951–1960. DOI : 10.1016/j.mspro.2014.07.229.

6. Kumar D., Angra S., Singh S. Mechanical Properties and Wear Behaviour of Stir Cast Aluminum Metal Matrix Composite : A Review. International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2022. Vol. 35, Iss. 4. P. 794–801. DOI : 10.5829/ije.2022.35.04a.19.

7. Ramanathan A., Krishnan P.K., Muraliraja R. A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges and research opportunities. Journal of Manufacturing Processes. 2019. Vol. 42. P. 213–245. DOI : 10.1016/J.JMAPRO.2019.04.017.

8. Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А. Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов. Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2013. № 2 (99). С. 210–217.

9. Aniban N., Pillai R., Pai B. An analysis of impeller parameters for aluminium metal matrix composites synthesis. Materials & Design. 2002. Vol. 23, Iss. 6. P. 553–556. DOI : 10.1016/S0261-3069(02)00024-9.

10. Farooq M., Jalal S. A Comparative Study of the Impact of the Stirrer Design in the Stir Casting Route to Produce Metal Matrix Composites. Advances in Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 2021. P. 1–15. DOI : 10.1155/2021/4311743.

11. Tran T.T., Vo T.T., Cho S.C., Lee D.H., Hwang W.R. A stir casting system for drawdown of light particles in manufacturing of metal matrix composites. Journal of Materials Processing Technology. 2018. Vol. 257. P. 123–131. DOI : 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.025.

12. Sankhla A. & Kaushik P. Metal Matrix Composites Fabricated by Stir Casting Process – A Review. Advances in Materials and Processing Technologies. 2021. Vol. 8. P. 1–22. DOI : 10.1080/2374068X.2020.1855404.

13. Прусов Е.С., Панфилов А.А., Аракелян С.М., Деев В.Б., Лесив Е.М. Технологические особенности получения литых алюмоматричных композиционных материалов с карбидом бора методом механического замешивания. Литейное производство. 2021. № 12. С. 12–16.

14. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021619286. Программа для математической оценки степени равномерности распределения армирующих частиц в структуре композиционных материалов / Шабалдин И.В., Прусов Е.С. Заявка № 2021618320 от 02.06.2021 ; опубл. 08.06.2021.

15. Prusov E.S., Shabaldin I.V., Deev V.B. Quantitative characterization of the microstructure of in situ aluminum matrix composites. Journal of Physics:

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЛИТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЭКЗОГЕННОЙ ФАЗЫ

Conference Series. 2021. Vol. 2131. № 4. P. 042040. DOI : 10.1088/1742-6596/2131/4/042040.

16. Prusov E., Aborkin A., Deev V., Bokaryov. D.V., Babin D. Tribological behavior of cast aluminum matrix composites after multiple remelting. Proceedings of the 18th International Conference on Tribology (SERBIATRIB'23). Kragujevac, 2023. P. 132–136.

Информация об авторах

Е. С. Прусов – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии функциональных и конструкционных материалов» Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

И. В. Шабалдин – лаборант-исследователь Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

В. Б. Деев – доктор технических наук, главный научный сотрудник Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых; профессор Уханьского текстильного университета; профессор кафедры «Обработка металлов давлением» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

REFERENCES

1. Miracle, D.B. (2005). Metal matrix composites - From science to technological significance. *Composites Science and Technology*, (65), 2526-2540. DOI : 10.1016/J.COMPSCITECH.2005.05.027.

2. Mortensen, A. & Llorca, J. (2010). Metal Matrix Composites. *Annual Review of Materials Research*, (40), 243-270. DOI : 10.1146/ANNUREV-MATSCI-070909-104511.

3. Garg, P., Jamwal, A., Kumar, D., Sadasivuni, K.K., Hussain, C.M. & Gupta, P. (2019). Advance research progresses in aluminium matrix composites: manufacturing & applications. *Journal of Materials Research and Technology*, (8), 4924-4939. DOI : 10.1016/J.JMRT. 2019.06.028.

4. Prusov, E.S. & Panfilov, A.A. (2011). Properties of cast aluminum-based composite alloys reinforced by endogenous and exogenous phases. *Russian Metallurgy (Metally)*, (7), 670-674. DOI : 10.1134/S0036029511070123.

5. Kala, H., Mer, K.K.S. & Kumar, S. (2014). A review on mechanical and tribological behaviors of stir cast aluminum matrix composites. *Procedia Materials Science*, (6), 1951-1960. DOI : 10.1016/j.mspro.2014.07.229.

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*, (35), 794-801. DOI : 10.5829/ije.2022.35.04a.19.

7. Ramanathan, A., Krishnan, P.K. & Muraliraja, R. (2019). A review on the production of metal matrix composites through stir casting - Furnace design, properties, challenges, and research opportunities. *Journal of Manu-*

facturing Processes, (42), 213-245. DOI : 10.1016/J.JMAPRO.2019.04.017.

8. Panfilov, A.A., Prusov, E.S. & Kechin, V.A. (2013). Problems and prospects of development of production and application of aluminum matrix composite alloys. *Trudi NGTU im. R.E. Alekseeva*, (2). 210-217. (In Russ.).

9. Aniban, N., Pillai, R. & Pai, B. (2002). An analysis of impeller parameters for aluminium metal matrix composites synthesis. *Materials & Design*, (23), 553-556. DOI : 10.1016/S0261-3069(02)00024-9.

10. Farooq, M. & Jalal, S. (2021). A Comparative Study of the Impact of the Stirrer Design in the Stir Casting Route to Produce Metal Matrix Composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, (2021), 1-15. DOI : 10.1155/2021/4311743.

11. Tran, T.T., Vo, T.T., Cho, S.C., Lee, D.H. & Hwang, W.R. (2021). A stir casting system for drawdown of light particles in manufacturing of metal matrix composites. *Journal of Materials Processing Technology*, (257), 123-131. DOI : 10.1016/j.jmatprotec.2018.02.025.

12. Sankhla, A. & Kaushik, P. (2021). Metal Matrix Composites Fabricated by Stir Casting Process - A Review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, (8), 1-22. DOI : 10.1080/2374068X.2020.1855404.

13. Prusov, E.S., Panfilov, A.A., Arakelyan, S.M., Deev, V.B. & Lesiv, E.M. (2021). Technological features of obtaining cast aluminum matrix composite materials with boron carbide by mechanical mixing. *Liteynoe proizvodstvo*, (12), 12-16. (In Russ.).

14. Shabaldin, I.V. & Prusov, E.S. Cert. 2021619286. A program for mathematical evaluation of the degree of uniformity of the distribution of reinforcing particles in the structure of composite materials, published on 08.06.2021. (In Russ.).

15. Prusov, E.S., Shabaldin, I.V. & Deev, V.B. (2021). Quantitative characterization of the microstructure of in situ aluminum matrix composites. *Journal of Physics: Conference Series*. (2131). 042040. DOI : 10.1088/1742-6596/2131/4/042040.

16. Prusov, E., Aborkin, A., Deev, V., Bokaryov. D.V., Babin, D. Tribological behavior of cast aluminum matrix composites after multiple remelting. Proceedings of the 18th International Conference on Tribology (SERBIATRIB'23). Kragujevac, 2023. P. 132-136.

Information about the authors

E. S. Prusov - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department "Technologies of Functional and Structural Materials" of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.

I. V. Shabaldin - laboratory assistant-researcher of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs.

V. B. Deev - Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; Professor of the Wuhan Textile University; Professor of the Department "Metal Processing by pressure" of the National Research Technological University "MISIS".

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2023; одобрена после рецензирования 18 сентября 2023; принята к публикации 20 ноября 2023.

The article was received by the editorial board on 26 Mar 2023; approved after editing on 18 Sep 2023; accepted for publication on 20 Nov 2023.