



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-116-121>
УДК 621.79

Поступила 10.01.2020
Received 10.01.2020

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ АЛЮМИНИЕВО–МЕДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЕЙНОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

В. А. КАЛИНИЧЕНКО, А. С. КАЛИНИЧЕНКО, С. В. ГРИГОРЬЕВ, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: kvlad@bntu.by

Для создания пар трения, работающих в сложных условиях эксплуатации, в настоящее время все шире применяются композиционные материалы. Свою нишу занимают и композиционные материалы, получаемые с применением литейных технологий. Несмотря на то что многие композиционные материалы были достаточно изучены, представляет интерес развитие новых областей их применения и придания им требуемых потребителем свойств. В настоящей работе были рассмотрены композиционные материалы на основе силуминов, армированные медными гранулами. Внимание было уделено взаимодействию между матричным сплавом и материалом упрочняющей фазы как определяющему свойству композиционного материала. Проанализировано распределение основных легирующих элементов в объеме композиционного материала, а также в зонах раздела фаз. Проведен анализ возможности получения прочной межграницной зоны контакта армирующей составляющей и материала матрицы без значительного растворения армирующего материала.

Ключевые слова. *Композиционные материалы, литейные технологии, алюминиевые сплавы, медные сплавы, антифрикционные материалы, износостойкие материалы.*

Для цитирования. *Калиниченко, В. А. Особенности структурообразования алюминиево-медных композиционных материалов, получаемых литейной технологией / В. А. Калиниченко, А. С. Калиниченко, С. В. Григорьев // Литье и металлургия. 2020. № 1. С. 116–121. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-116-121>.*

PARTICULARITIES OF STRUCTURE FORMATION OF ALUMINUM–COPPER COMPOSITE MATERIALS MANUFACTURED BY CASTING TECHNOLOGY

U. A. KALINICHENKO, A. S. KALINICHENKO, S. V. GRIGORIEV, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: kvlad@bntu.by

To create friction pairs operating in severe working conditions, composite materials are now increasingly used. Composite materials obtained with the use of casting technologies are of interest due to the possibility to manufacture wide range of compositions at low price compared to powder metallurgy. Despite the fact that many composite materials have been sufficiently studied, it is of interest to develop new areas of application and give them the properties required by the consumer. In the present work the composite materials on the basis of silumin reinforced with copper granules were considered. Attention was paid to the interaction between the matrix alloy and the reinforcing phase material as determining the properties of the composite material. The analysis of distribution of the basic alloying elements in volume of composite material and also in zones of the interphases interaction is carried out. The analysis of the possibility of obtaining a strong interphase zone of contact between the reinforcing component and the matrix material without significant dissolution of the reinforcing material is carried out.

Keywords. *Composite materials, casting technologies, aluminum alloys, copper alloys, antifriction materials, wear-resistant materials.*

For citation. *Kalinichenko U. A., Kalinichenko A. S., Grigoriev S. V. Particularities of structure formation of aluminum-copper composite materials manufactured by casting technology. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 1, pp. 116–121. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-116-121>.*

В настоящее время весьма актуально создание композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, которые широко применяются в автомобилестроении, авиастроении, космической сфере в качестве конструкционных, антифрикционных и других материалов. Представляет практический интерес применение алюминиевых композиционных материалов в медицине, строительстве, электротехнике

и электронике [1]. Это обусловлено тем, что алюминиевые композиционные сплавы характеризуются легким удельным весом и благоприятным сочетанием целого комплекса механических и эксплуатационных свойств (повышенных нагрузок, скоростей, температур) [2].

Существует ряд технологий, применяемых для получения композиционных материалов в зависимости от вида упрочняющей фазы (длинные или короткие волокна, проволока, листы, частицы) [3].

Например, был получен композиционный материал на основе алюминия, упрочненный стальной проволокой, который в интервале температур $-196 - + 500$ °С по прочности превосходит значительно существующие высокопрочные алюминиевые сплавы. Кроме того, разработанные композиционные сплавы обладают длительной прочностью в температурном интервале $300-500$ °С в 5–7 раз выше, чем у жаропрочного алюминиевого сплава САП-1 [4].

Рассматривая существующие технологии производства композиционных материалов, их можно разделить на две большие группы: методы порошковой металлургии и литейные технологии (инфильтрация расплава в каркас, образованный упрочняющей фазой). Применение экономически выгодного процесса инфильтрации позволяет получить широкий спектр композиционных материалов и следующие преимущества:

- возможность получить изделие из композиционного материала точной формы с хорошим качеством поверхности;
- адаптация процесса к массовому производству;
- широкий выбор вида упрочняющей фазы и материала матрицы;
- высокая производительность процесса с относительно низкой себестоимостью;
- возможность местного упрочнения изделия.

Процесс инфильтрации был успешно применен для получения алюминиевого композиционного материала, упрочненного частицами Al_2O_3 [5].

Литейные технологии были успешно применены для получения композиционных материалов на основе медных сплавов, упрочненных стальными [6] или чугунными гранулами [7], которые характеризовались высокими физико-механическими и антифрикционными свойствами.

Ранее в работе [8] были рассмотрены аспекты получения литых композиционных материалов с алюминиевой матрицей, упрочненной чугунными армирующими гранулами. Однако у алюминиево-чугунных композиций не обеспечивалась высокая износостойкость и хорошие физико-механические свойства в результате недостаточно хорошего смачивания расплава упрочняющих гранул.

Необходимо отметить, что успех синтезирования композиционного материала с алюминиевой матрицей во многом определяется управлением взаимодействия матричного сплава и упрочняющей фазы (на границе раздела фаз). При этом основными требованиями для синтеза являются:

- хорошая смачиваемость необходима для синтеза, особенно если применяется литейная технология при низком давлении;
- реакции на границе раздела фаз должны быть ограничены для избежания деградации упрочняющей фазы и образования новых хрупких фаз;
- корректная связь должна иметь место для достижения желаемых свойств (например, высокой жесткости или хороших свойств в поперечном направлении) [3].

В результате была поставлена задача – разработать композиционный материал с высокими физико-механическими свойствами, обладающий более низкой массой по сравнению с медно-чугунными композициями. Для решения данной задачи необходимо более глубоко изучить взаимодействие матричного расплава и гранул упрочняющей фазы. Для этого было решено провести исследования композиционного материала на основе силуминов с армирующей составляющей из медных сплавов.

Известно, что широкую нишу в производстве занимают алюминиево-медные сплавы [9], имеющие повышенные физико-механические характеристики по сравнению со всеми стандартными силуминами (рис. 1).

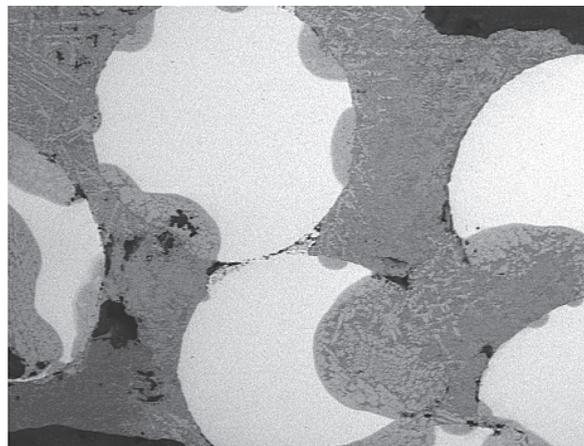


Рис. 1. Общий вид алюминиево-медного композиционного материала

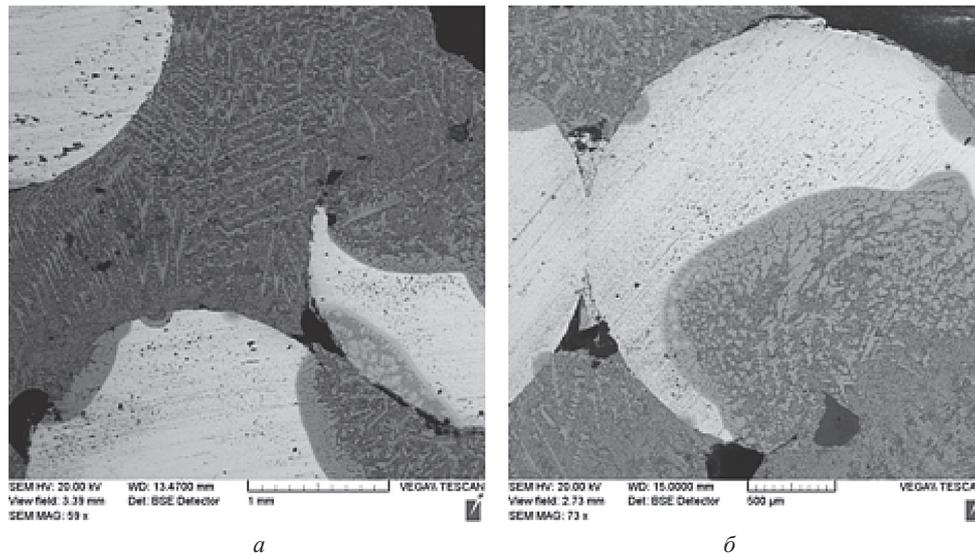
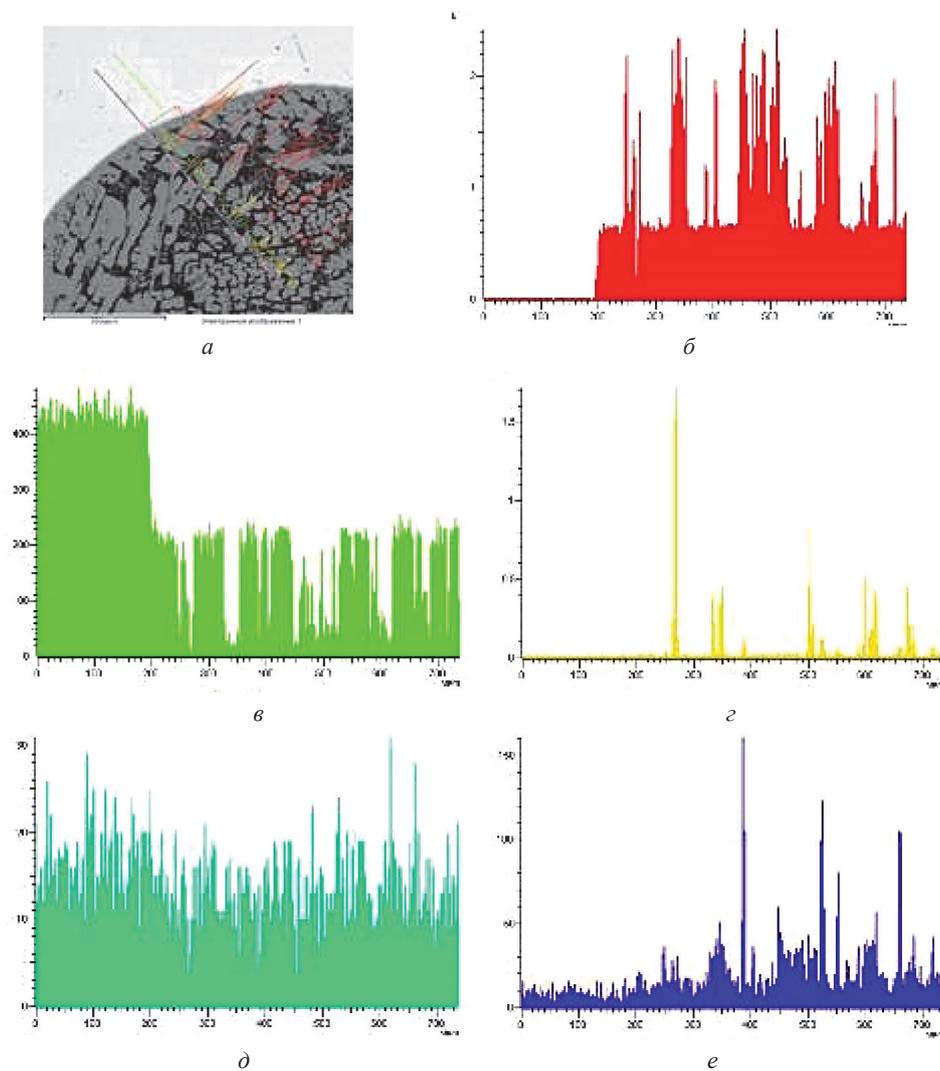


Рис. 2. Взаимодействие армирующей фазы с матричным расплавом алюминиево-медного композиционного материала



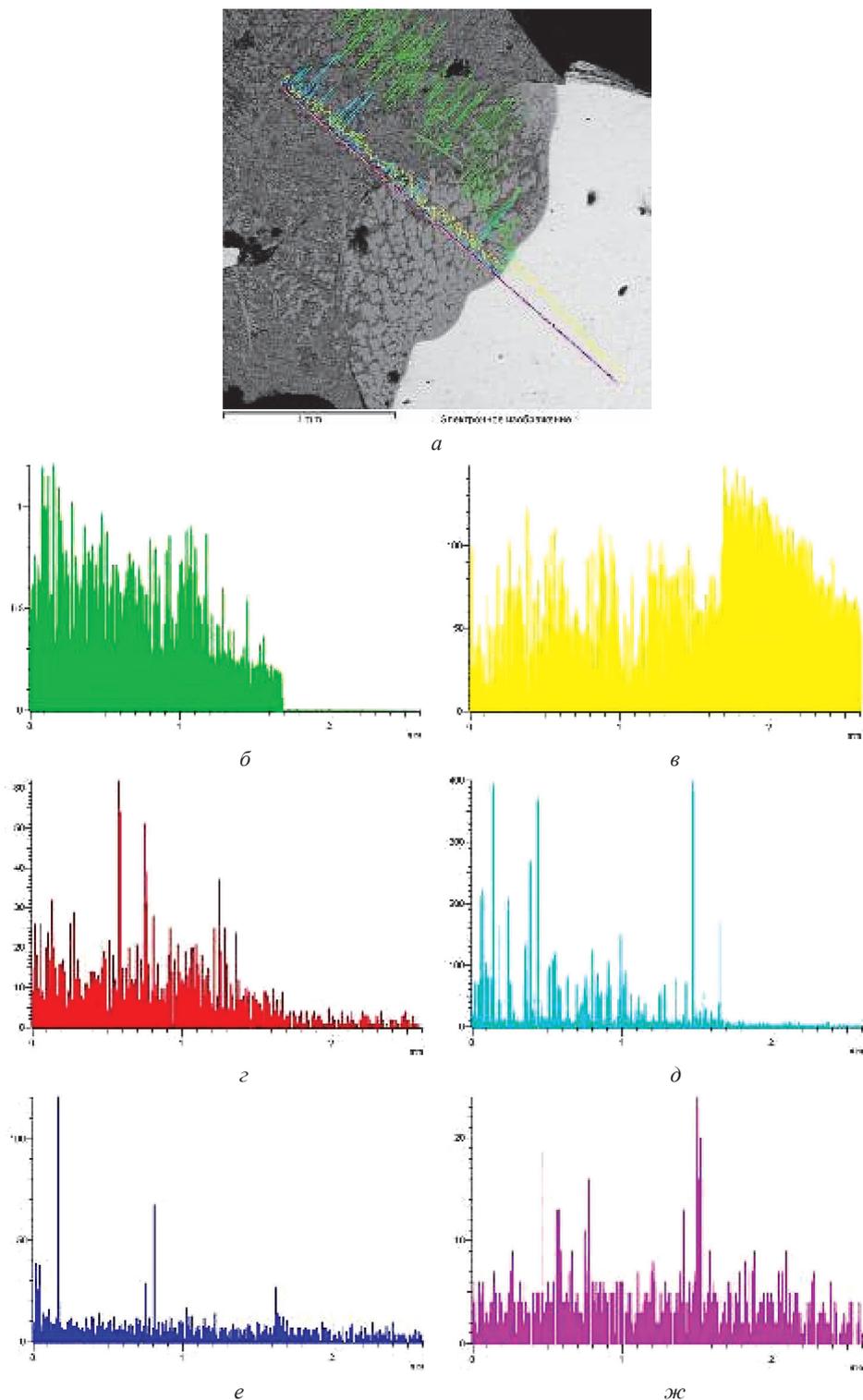


Рис. 4. Химический анализ в зоне подрастворения армирующих гранул с матричным расплавом алюминиево-медного композиционного материала: *a* – исследуемая контактная зона; *б* – алюминий; *в* – медь; *г* – магний; *д* – кремний; *е* – кислород; *ж* – железо

Было решено исследовать композицию силумин-медные гранулы для анализа адгезии меди к алюминию и влияния времени выдержки на формирование фаз в переходной зоне. Для этого медь прошла первичную обработку, включающую зачистку поверхности абразивными материалами, с целью избавления от окисленной поверхности и с дальнейшим покрытием из флюсующего материала. Покрытие флюсом должно было обеспечивать хорошую смачиваемость, с одной стороны, и предотвращать интенсивное взаимодействие меди и алюминия, с другой стороны. Далее в форму, изготовленную из электротехнического графита, была осуществлена загрузка обработанных медных гранул с последующим уплотнением на вибростенде и проведена сифонная заливка промышленного силумина АК7 ГОСТ 1583-93.

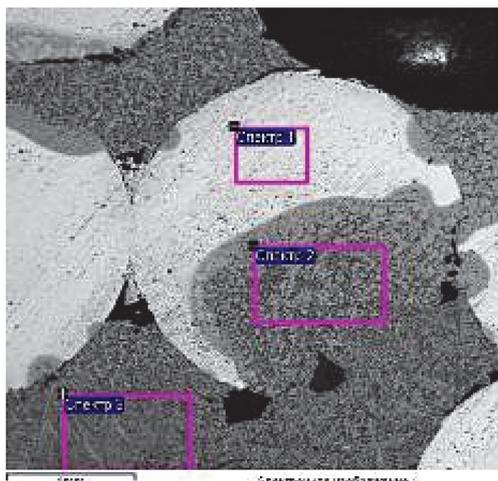


Рис. 5. Участки для исследования химического состава переходной зоны взаимодействия армирующей фазы с матричным расплавом алюминиево-медного композиционного материала

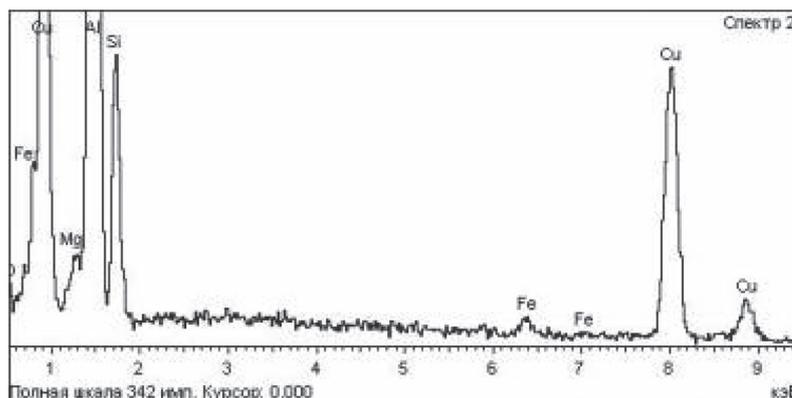


Рис. 6. Спектр по химическим элементам в переходной зоне взаимодействия армирующей фазы с матричным расплавом алюминиево-медного композиционного материала

Как видно из рис. 2, а, б, на некоторых участках происходит интенсивное взаимодействие армирующей фазы с матричным расплавом. Возможно, на этих участках не было защитного слоя из флюса. При этом наблюдается частичное растворение армирующей фазы и образование значительных межфазных зон контакта.

Ранее было установлено [8], что плохая смачиваемость расплавом гранул и полное отсутствие зоны взаимодействия матричного сплава и упрочняющей фазы вызывают выкрашивание армирующей составляющей из матрицы после приложения механических нагрузок. Это приводит к резкому снижению механических свойств композиционных материалов или полному отсутствию работоспособности материала как композиционного.

Для оценки взаимодействия матрицы и армирующей составляющей был проведен химический анализ в зоне контакта армирующих гранул с матрицей без взаимодействия (рис. 3) и в зоне подрастворения армирующей составляющей матрицы (рис. 4).

В зоне простого контакта (см. рис. 3, а) видны ярко выраженные границы по алюминию (рис. 3, б) и меди, которая содержится и в матричном сплаве (рис. 3, в). Видно присутствие оксидов, а также кремния и магния в матричном сплаве (рис. 3, г, д, е).

Картина распределения элементов на границе фаз при наличии растворения отличается от предыдущей (рис. 4).

Рисунок подтверждает образование интерметаллидов алюминий-медь. Для определения ориентировочных свойств переходной зоны было проведено исследование ее химического состава. Для этого были выбраны участок гранулы (спектр 1) и участки переходной зоны в гранулах и матрице (спектры 2, 3) (рис. 5).

Были получены спектры по химическим элементам. На рис. 6 показан спектр 2 для переходной зоны взаимодействия армирующей фазы с матричным расплавом алюминиево-медного композиционного материала.

Обобщенные данные исследования приведены в таблице.

Анализ химических элементов в гранулах и переходной зоне взаимодействия армирующей фазы с матричным расплавом (см. рис. 5), мас. %

Спектр	O	Mg	Al	Si	Fe	Cu	Итого
Спектр 1, армирующая гранула	4,19		0,63			95,18	100,00
Спектр 2, контактная зона в грануле	2,45	0,44	60,98	6,20	0,71	29,22	100,00
Спектр 3, контактная зона в области матрицы	2,31	0,33	65,64	6,19	0,33	25,21	100,00
Максимальные значения	4,19	0,44	65,64	6,20	0,71	95,18	
Минимальные значения	2,31	0,33	0,63	6,19	0,33	25,21	

Из таблицы видно, что составы переходной зоны в матрице и гранулах очень близки. Формируется эвтектика с высоким содержанием меди. Интерметаллиды алюминий-медь характеризуются хрупкостью

и их значительный объем нежелателен. Синтез композита силумин-медь требует очень точного контроля температуры инфильтрации и создания равномерного слоя флюса на гранулах армирующей фазы.

Выводы

Проведенные исследования получения алюминиево-медного композиционного материала подтверждают важность управления процессом взаимодействия матричного сплава и армирующих гранул на границе раздела фаз. Установлено, что при создании алюминиево-медных композиций возможно получение прочной межграницной зоны контакта без значительного растворения армирующей составляющей при соблюдении всех технологических параметров. Технологические параметры инфильтрации имеют очень узкий интервал оптимальных значений, при отклонении от которых наблюдается значительное растворение упрочняющей фазы матричным сплавом с образованием хрупких интерметаллидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фридляндер И. Н.** Современные алюминиевые, магниевые сплавы и композиционные материалы на их основе. ВИАМ, 2002, вып. 203509. 19 с. Режим доступа <https://www.viam.ru/public/files/2002/2002-203509.pdf>. Дата 19.09.2019.
2. **Алюминиевые** композиционные сплавы – сплавы будущего: учеб. пособ. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 82 с.
3. **Froyen L.** Aluminium Matrix Composites Materials / L. Froyen, B. Verlinden // European Aluminium Association, 1994. 28 p.
4. **Расщупкин В. П.** Композиционные материалы системы алюминиевые сплавы–сталь / В. П. Расщупкин, Г. С. Гарибин, В. Н. Гурдин // Омский науч. вестн. 2009. № 1 (77). С. 15–16.
5. **Dobrzański L. A.** Aluminium matrix composites fabricated by infiltration method / L. A. Dobrzański, M. Kremzer, A. J. Nowak, A. Nagel // Archives in Material Science and Engineering. 2009. Vol. 36. Issue 1. P. 5–11.
6. **Затуловский С. С.** Литые композиционные материалы / С. С. Затуловский, В. Я. Кезик, Р. К. Иванова. Киев: Техника, 1990. 240 с.
7. **Кезик В. Я.** Формирование структуры поверхностного объема литых макрогетерогенных композиционных материалов в условиях низкоскоростного трения без смазки / В. Я. Кезик, А. С. Калининченко, Р. К. Иванова // Литье и металлургия. 2003. № 2. С. 118–123.
8. **Калининченко А. С.** Особенности получения макрогетерогенных композиционных материалов с алюминиевой матрицей литейными технологиями / А. С. Калининченко, В. А. Калининченко, А. Г. Слуцкий, В. А. Шейнерт // Тр. 23-й МНТК «Литейное производство и металлургия 2015. Беларусь». Жлобин, 2015. С. 41–44.
9. **Немененок Б. М.** Теория и практика комплексного модифицирования силуминов / Б. М. Немененок. Минск: Технопринт, 1999. 272 с.
10. **Производство** отливок из сплавов цветных металлов / А. В. Курдюмов [и др.]. М.: Металлургия, 1981. 416 с.

REFERENCES

1. **Fridljander I. N.** *Sovremennye aljuminievyje, magnievyje splavy i kompozicionnyje materialy na ih osnove* [Modern aluminum, magnesium alloys and composite materials based on them]. VIAM, 2002, vyp. 203509, 19 p.
2. **Luc A. R., Galochkina I. A.** *Aljuminievyje kompozicionnyje splavy – splavy budushhego* [Aluminum Composite Alloys – Alloys of the Future]. Samara, Samarskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet Publ., 2013, 82 p.
3. **Froyen L., Verlinden B.** Aluminium Matrix Composites Materials. *European Aluminium Association*, 1994. 28 p.
4. **Rasschupkin V. P., Garibin G. S., Gurdin V. N.** Kompozicionnyje materialy sistemy aljuminievyje splavy – stal' [Composite materials of the system aluminum alloys – steel]. *Omskij nauchnyj vestnik = Omsk Scientific Herald*, 2009, no. 1 (77), pp. 15–16.
5. **Dobrzański L. A., Kremzer M., Nowak A. J., Nagel A.** Aluminium matrix composites fabricated by infiltration method. *Archives in Material Science and Engineering*, 2009, vol. 36, pp. 5–11.
6. **Zatulovskij S. S., Kezik V. Ja., Ivanova R. K.** *Litye kompozicionnyje materialy* [Cast Composite Materials]. Kiev, Tehnika Publ., 1990. 240 p.
7. **Kezik V. Ja., Kalinichenko A. S., Ivanova R. K.** Formirovanie struktury poverhnostnogo ob#ema lityh makroheterogennyh kompozicionnyh materialov v uslovijah nizkoskorostnogo trenija bez smazki [The formation of the surface volume structure of cast macroheterogeneous composite materials under conditions of low-speed friction without lubrication]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2003, vol. 91, no. 2, pp. 118–123.
8. **Kalinichenko A. S., Kalinichenko V. A., Sluckij A. G., Shejnert V. A.** *Osobennosti poluchenija makroheterogennyh kompozicionnyh materialov s aljuminievoj matricej litejnymi tehnologijami* [Features of obtaining macroheterogeneous composite materials with an aluminum matrix by foundry technology]. Trudy 23-j MNTK «Litejnoe proizvodstvo i metallurgija 2015. Belarus'», Zhlobin, 2015. [Transactions of the 23rd MNTK «Foundry and Metallurgy 2015. Belarus». Zhlobin]. Zhlobin, 2015, pp. 41–44.
9. **Nemenenok B. M.** *Teorija i praktika kompleksnogo modifitsirovanija siluminov* [Theory and practice of complex modification of silumins]. Minsk, Tehnoprnt Publ., 1999. 272 p.
10. **Kurdjumov A. V.** *Proizvodstvo otlivok iz splavov cvetnyh metallov* [Production of castings from non-ferrous metal alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1981. 416 p.