

Оригинальная статья

УДК 669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-25-34

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРЕМНИЯ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ФАЗЫ TiC ПРИ ПОЛУЧЕНИИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АК10М2Н – 10 % TiC МЕТОДОМ СВС

© 2025 г. Ю. В. Шерина, А. Р. Луц, Д. В. Закамов

Самарский государственный технический университет (Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244)

Аннотация. Алюмоматричные композиционные материалы (АМКМ) сочетают в себе комплекс свойств матричного сплава и армирующего наполнителя, что привлекает к ним большой интерес. Для их изготовления наиболее целесообразно применение жидкофазных методов, особое место в числе которых занимает метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Он позволяет получать ультрадисперсные армирующие фазы непосредственно в расплаве из исходных элементных порошков микронных размеров, исключить закупку дорогостоящих высокодисперсных порошков, а также сократить энергозатраты и время получения готового продукта. При использовании этого метода возможен синтез керамической фазы TiC с размерами частиц от 100 нм, причем не только в расплаве технического алюминия, но и в присутствии легирующих элементов. Рассматриваемая технология открывает большие возможности для повышения комплекса свойств существующих промышленных алюминиевых сплавов и особенно привлекательна для сплавов системы Al – Si, широко востребованных, но не отличающихся высокими механическими характеристиками. Приводятся результаты исследования по изучению влияния кремния в составе матричного сплава АК10М2Н на стабильность фазы TiC, образуемой в его расплаве методом СВС. В ходе экспериментальных исследований увеличивали время выдержки расплава при температуре 900 °С. Установлено, что по истечении 5 мин в составе образуется исключительно требуемая фаза TiC, однако дальнейшая выдержка приводит к ее деградации и после 15 мин выдержки образуется фаза SiC, а после 30 мин – МАХ-фаза состава Ti₃SiC₂, что приводит к снижению твердости композиционного материала. По результатам исследования сделан вывод, что наличие кремния в составе матричного сплава может оказывать негативное влияние на стабильность целевой фазы карбида титана, что обуславливает необходимость строгого соблюдения технологии и не превышения времени выдержки расплава более 5 мин.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, карбид титана, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, композиционный материал

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А12-2110800012-0).

Для цитирования: Шерина Ю.В., Луц А.Р., Закамов Д.В. Исследование влияния кремния на стабильность фазы TiC при получении композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC методом СВС. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):25–34. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-25-34](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-25-34)

*Original article***STUDY OF THE INFLUENCE OF SILICON ON THE STABILITY OF THE TiC PHASE IN THE PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIAL AK10M2N – 10 % TiC BY THE SHS METHOD**

© 2025 Yu. V. Sherina, A. R. Lutz, D. V. Zakamov

Samara State Technical University (Russia, 443100, Samara, 244 Molodogvardeyskaya St.)

Abstract. Aluminum matrix composite materials (AMCM) combine a set of properties of a matrix alloy and a reinforcing filler, which attracts great interest from researchers. For their manufacture, it is most advisable to use liquid-phase methods, a special place among which is occupied by the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS), which allows to produce ultrafine reinforcing phases directly in the melt from the initial micron-sized elemental powders and exclude the purchase of expensive highly dispersed powders, as well as reduce energy consumption and time to obtain the finished product. Using this method, it is possible to synthesize the ceramic phase of TiC with particle sizes from 100 nm, not only in the melt of technical aluminum, but also in the presence of alloying elements. This technology opens up great opportunities for improving the complex properties of existing industrial aluminum alloys and is especially attractive for alloys of the Al-Si system, which are widely in demand, but do not differ in high mechanical characteristics. The presented paper presents the results of a study on the effect of silicon in the matrix alloy AK10M2H on the stability of the TiC phase formed in its melt by the SHS method. During experimental studies, the melt holding time was increased at a temperature of 900 °C and it was found that after 5 minutes, the exclusively required TiC phase is formed in the composition, however, further exposure leads to its degradation and after 15 minutes of exposure, the SiC phase is formed, and after 30 minutes, the MAX phase of the Ti_3SiC_2 composition, which leads to reducing the hardness of the composite material. According to the results of the study, it was concluded that the presence of silicon in the matrix alloy may have a negative effect on the stability of the target phase of titanium carbide, which necessitates strict compliance with the technology and not exceeding the melt holding time of more than 5 minutes.

Keywords: aluminum alloys, titanium carbide, self-propagating high-temperature synthesis, composite material

Acknowledgements. The research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (topic no. AAAAA-A12-2110800012-0).

For citation: Sherina Yu.V., Lutz A.R., Zakamov D.V. Study of the influence of silicon on the stability of the TiC phase in the production of composite material AK10M2N – 10 % TiC by the shs method. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):25–34. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-25-34](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-25-34)

Введение

Сплавы на основе алюминия и кремния (силумины) широко используются в промышленности благодаря их небольшой массе, устойчивости к коррозии и высоким литейным свойствам (жидкотекучесть, малая линейная усадка). Они широко применяются для производства средних и крупных литых деталей (головки цилиндров, поршни двигателей внутреннего сгорания и др.). Наибольшее распространение получили специальные силумины, в составе которых, помимо кремния, присутствуют и другие легирующие элементы (медь, магний, марганец, титан, никель, цирконий и хром). Даже после легирования силумины уступают по прочности и износостойкости другим сплавам, например, дюралюминам. Поэтому задача улучшения механических характеристик силуминов остается актуальной [1].

Одним из наиболее перспективных способов улучшения показателей прочности и износостойкости силуминов является армирование их дисперсными керамическими фазами, в качестве которых эффективно используются частицы карбидов кремния или титана [2]. Несмотря на то, что соединение SiC производится в промышленных объемах и экономически более выгодно, его применение может привести к образованию пластинчатой фазы Al_4C_3 , наличие которой приводит к ухудшению адгезионной связи, и, следовательно, физико-механических свойств [3]. Использование карбида титана для армирования менее распространено в силу его высокой стоимости, но является более предпочтительным, так как TiC обладает более высокими физико-механическими свойствами (температура плавления, твердость, термодинамическая стабильность и др.) и

имеет ГЦК решетку, близкую по размерам к решетке матричного алюминия. Это дает возможность выступать частицам в качестве центров кристаллизации и обладать более высокой смачиваемостью [4].

На конечные характеристики любого дисперсно армированного композита большое влияние оказывает способ его производства. Среди существующих методов производства алюмоматричных композиционных материалов (АМКМ) [5] наиболее часто применяют жидкофазные методы, среди которых особое место занимает самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) в расплаве, разработанный в Самарском государственном техническом университете [6; 7]. Метод СВС подразумевает синтез карбидной фазы из элементных порошков непосредственно в расплаве, что позволяет устранить проблемы загрязнения расплава оксидами и обеспечивает хорошую смачиваемость керамической фазы матричным расплавом, а также снижает энергетические и временные затраты на производство АМКМ.

Проведенный анализ отечественных работ в рассматриваемой области показал, что АМКМ на основе силуминов получают преимущественно методом механического замешивания. В работе [8] установлено, что армирование матричных сплавов АК12 и АК12М2МгН карбидом кремния в количестве 5 и 3 % (здесь и далее по массе) способствует повышению твердости с 624 до 712 НВ для первого сплава и с 988 до 1070 НВ для второго, а также увеличению их износостойкости не менее чем в 2 раза. В работах [9; 10] проведено сравнение влияния армирования фазами SiC и TiC в количестве 5 и 10 % на свойства сплавов АК12 и АК12М2МгН, а также показано, что максимальное увеличение твердости (не менее чем на 10 НВ) и износостойкости (не менее чем в 2 раза) с обеспечением малого коэффициента трения (примерно 0,33) наблюдается при добавлении именно фазы TiC в количестве 10 %.

В работах [11; 12] также активно исследуется армирование фазой карбида титана как вводимой извне, так и синтезируемой непосредственно в расплаве методом СВС. В работе [13] показана возможность успешного формирования фазы TiC в составе сплава, содержащем до 40 % кремния. В работе [12] хотя и показана возможность ввода фазы карбида титана методом механического замешивания в состав сплава Al – 7 % Si – 4 % Cu (с примесями железа и марганца), но посредством рентгенофазового анализа установлено, что количество усвоенной армирующей фазы значительно меньше вводимого (5 вместо 20 %). В работе [14] сделан вывод о том, что при арми-

ровании силуминов карбидом титана наличие кремния приводит к снижению смачиваемости, и, как следствие, меньшему усвоению карбидной фазы. Кремний способствует распаду карбидной фазы с образованием интерметаллических фаз Al_4C_3 и затем соединения TiSi, в результате чего итоговая смачиваемость в системе Al – Si/TiC оказывается ниже, чем у системы Al – TiC. В ходе армирования фазой карбида титана силуминов особое внимание следует уделять выбору температурно-временных режимов [15 – 17], так как в работе [15] показана возможность армирования сплава Al – 7 % Si 10 % TiC при температуре расплава 800 °C, но проводимая далее длительная выдержка расплава в течение 6 ч приводит к распаду TiC с образованием тройной фазы Ti – Al – Si и интерметаллической – Al_4C_3 , хотя при этом отмечается возможность восстановления фазы TiC при увеличении температуры расплава выше 800 °C. В работе [16] отмечается, что при синтезе фазы карбида титана в составе АМКМ на основе Al – 12 % Si при температуре 800 °C увеличение времени выдержки с 5 до 20 мин приводит к практически полному распаду карбида титана без возможности последующего восстановления. Такое явление связывают со способностью кремния диффундировать в решетку карбида титана, разрушая его структуру [17]. При введении в лигатуру Al – 3 % Ti – 0,75 % C (полученную методом СВС при температуре 1000 °C) 7 или 13 % Si при температуре 800 °C (с выдержкой расплава 10 мин) формируются фазы Al_4C_3 и $TiAl_xSi_y$, а увеличение температуры до 900 °C способствует образованию фаз Al_4C_3 и Ti_3SiC_2 . В целом, анализ работ зарубежных исследователей по влиянию кремния в составе алюминиевых сплавов на стабильность армирующей фазы карбида титана показывает неоднозначность выводов, однако большинство из них все же указывают на вероятную деградацию фазы TiC в присутствии кремния при длительной выдержке с образованием побочных карбидных, интерметаллических фаз или MAX-фаз.

В Самарском государственном техническом университете ранее были проведены исследования по разработке технологии армирования методом СВС востребованного промышленностью поршневого сплава АК10М2Н, что позволило получить композиционный материал АК10М2Н – 10 % TiC, содержащий основные фазы Si и TiC и отличающийся повышенными характеристиками твердости и износостойкости [18; 19]. В рамках предложенной технологии после проведения синтеза предусмотрена технологическая выдержка расплава при температуре 900 °C в течение 5 мин, предназначенная для завершения химического взаимодействия компонентов. Од-

нако, с учетом того, что оценка термодинамической стабильности карбидной фазы в присутствии кремния существенно отличается, необходимо дальнейшее изучение влияния длительности времени выдержки на конечный фазовый состав композиционного материала, синтезированного методом СВС, что и было поставлено целью настоящей работы.

Методы и принципы исследования

В качестве матрицы использовали промышленный алюминиевый сплав АК10М2Н (ГОСТ 30620–98). В составе шихты использовали порошки титана марки ТПП-7 (ТУ 1791-449-05785388 – 2010), технического углерода П-701 (ГОСТ7885 – 86), взятые в стехиометрическом соотношении, а также галогидной соли Na_2TiF_6 (ТУ 6-09-01-425 – 77) в количестве 5 % от массы шихтовой смеси. Композиционные материалы получали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза по методике, приведенной в работе [18], однако, варьировали время выдержки расплава после синтеза при температуре 900 °С от 5 до 30 мин. Металлографический анализ осуществляли на растровом электронном микроскопе JSM-6390А с приставкой микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) JSM-2200. Исследование фазового состава происходило с применением рентгенофазового анализа (РФА). Съемку рентгеновских спектров проводили посредством автоматизированного дифрактометра ARL X'trA при непрерывном сканировании в интервале углов 2θ от 20 до 80° со скоростью 2 град./мин Си-излучения. Количественное содержание фаз определяли при помощи программы HighScorePlus. Твердость исследовали на твердомере ТШ-2М (ГОСТ 9012 – 59).

Основные результаты

На рис. 1 представлены микроструктуры композиционного материала на основе матричного сплава АК10М2Н, армированного 10 % TiC, с различным временем выдержки расплава при температуре 900 °С после завершения СВС-реакции взаимодействия компонентов шихты (титана и углерода). Анализ микроструктур после выдержки расплава в течение 5 мин позволяет сделать вывод о наличии фазы карбида титана глобулярной формы с размерами частиц от 180 нм до 2 мкм, расположенными преимущественно на границах с кристаллами кремния (рис. 1, а, б). Полученные данные МРСА для этого об-

разца подтверждают, что в составе частиц блочной фазы присутствуют только титан и углерод (рис. 2, а, спектр 001).

Дальнейшее увеличение времени выдержки расплава до 15 и 30 мин показало качественное изменение микроструктуры и вместо глобулярных частиц, свойственных по форме карбиду титана, преобладающими становятся частицы игольчатой и остроугольной формы (рис. 1, в – е), что дает возможность предположить изменение фазового состава композиционного материала и образование фаз Al_3Ti , SiC, Ti_3SiC_2 [4; 20; 21].

Микрорентгеноспектральный анализ образцов композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC с увеличенным временем выдержки (рис. 2, б, в) показывает отсутствие фаз, состоящих только из титана и углерода, что дает возможность предполагать несколько иной фазовый состав композиционного материала.

С целью установления точного фазового состава был проведен рентгенофазовый анализ синтезированных образцов, результаты которого приведены на рис. 3. Согласно полученным результатам, образец композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC после стандартной выдержки расплава в течение

5 мин включает только фазы кремния и карбида титана (рис. 3, а). Количественная обработка дифрактограммы показывает содержание кремния в количестве 10 % и карбидной фазы не менее 9 %, что дает возможность сделать вывод о сохранении химического состава матричного сплава и подтверждает обеспечение смачиваемости карбидных частиц расплавом [4; 22]. Полученные данные подтверждают, что вследствие быстротечности процесса СВС и малого времени выдержки процесс деградации образуемой фазы карбида титана не происходит [23; 24].

Однако с увеличением времени выдержки происходит качественное изменение фазового состава и после выдержки 15 мин появляется соединение SiC с массовым соотношением фаз в образце 7 % Si; 8 % TiC и 2 % SiC (рис. 3, б), а после 30 мин – Ti_3SiC_2 с соотношением 8 % Si, 5 % TiC и 2 % Ti_3SiC_2 (рис. 3, в).

Полученные результаты подтверждают данные работ [15 – 17], увеличение времени выдержки после синтеза карбидной фазы в расплаве силумина способствует распаду TiC и образованию фаз SiC или Ti_3SiC_2 . Характер изменения фазового состава в зависимости от времени выдержки представлен на рис. 4.

С целью оценки влияния изменения фазового состава на свойства композиционного материала

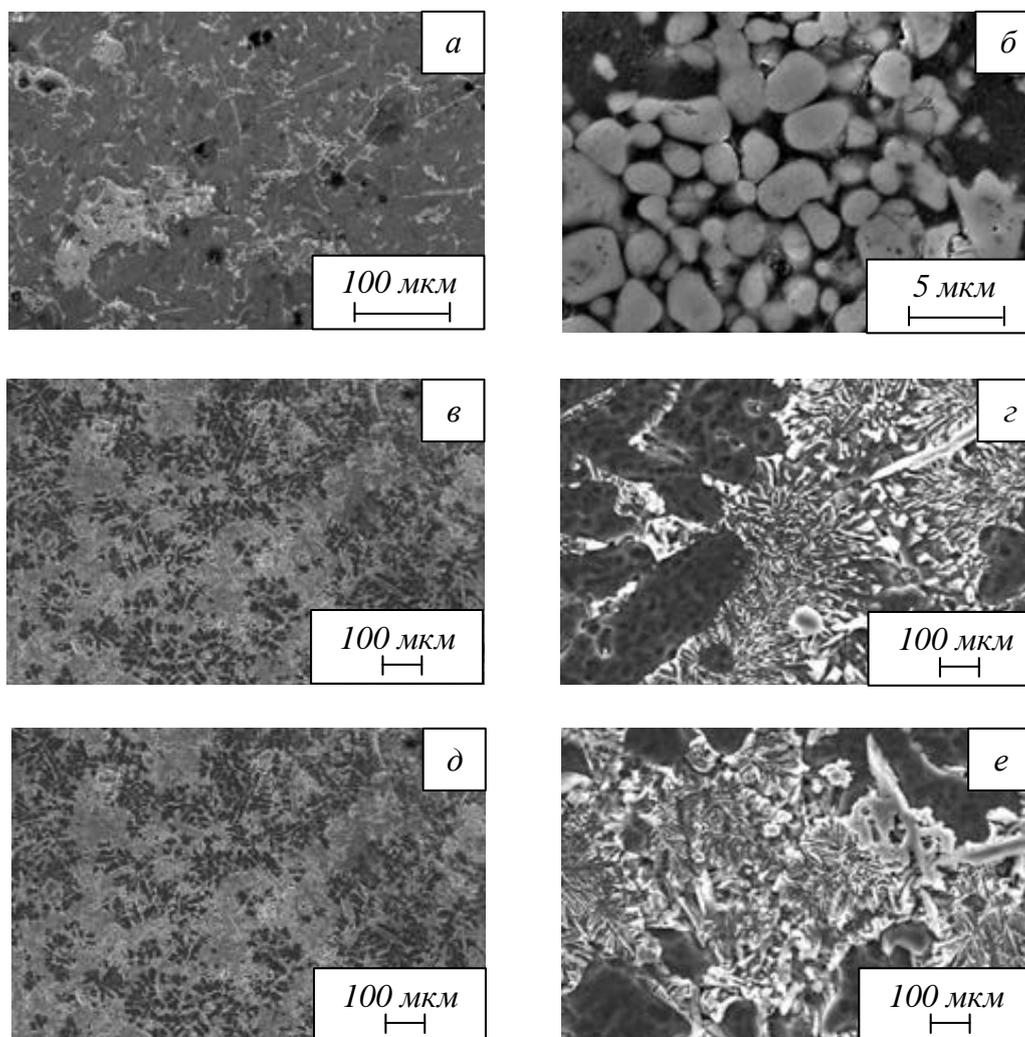


Рис. 1. Микроструктура композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC при выдержке 5 (а, б), 15(в, г), 30 мин (д, е)
 Fig. 1. The microstructure of the composite material АК10М2Н is 10 % TiC at an exposure time of 5 (а, б), 15 (в, г), 30 min (д, е)

были проведены замеры твердости полученных образцов (рис. 5). Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что любое армирование приводит к повышению твердости матричного сплава, однако наибольший показатель твердости (122 НВ) наблюдается в композиционных материалах АК10М2Н – 10 % TiC и АК10М2Н – 8 % TiC – 2 % SiC, что обусловлено высокой твердостью рассматриваемых карбидных фаз [4] и согласуется с данными работы [25]. В образце АК10М2Н – 5 % TiC – 2 % Ti₃SiC₂ твердость снижается до 115 НВ, что объясняется аномальной «мягкостью» фазы Ti₃SiC₂ по сравнению с большинством карбидов [26].

Выводы

По результатам проведенного исследования получено, что после завершения синтеза фазы карбида титана в расплаве, содержащем кремний, в ходе временной выдержки расплава при температуре 900 °С происходит ряд фазовых превращений с деградацией фазы TiC и образованием кремнийсодержащих фаз SiC и Ti₃SiC₂. Помимо

этого установлено, что наличие МАХ-фазы Ti₃SiC₂ приводит к снижению твердости композиционного материала. На основании полученных данных сделан вывод о нецелесообразности увеличения времени выдержки расплава и сохранения ее длительности в течение не более 5 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белов Н.А. *Фазовый состав алюминиевых сплавов*. Москва: МИСИС, 2009:234.
2. Рафальский И.В. *Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения*. Минск: БНТ, 2016:209.
3. Курбаткина Е.И., Косолапов Д.В., Ходькин Л.Д., Нигметов М.С. Исследование влияния добавки кремния на фазовый состав алюминиевых композиционных материалов, армированных частицами карбида кремния. *Труды ВИАМ*. 2014;6:35–38.
<http://doi.org/10.1186/s40712-014-0012-9>.

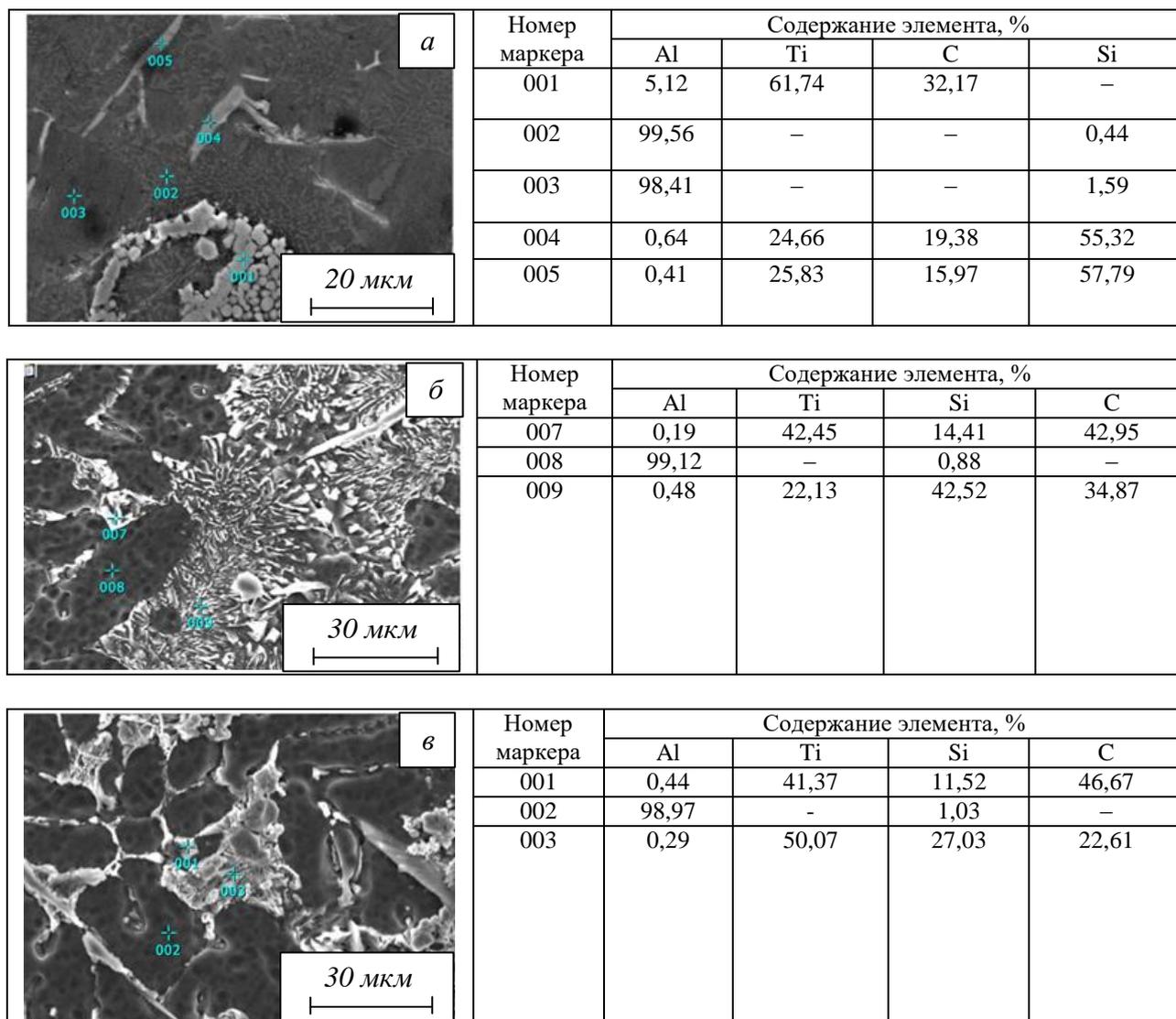


Рис. 2. МРСА композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC:

а – в – время выдержки 5, 15, 30 мин

Fig. 2. MPSA of composite material AK10M2N – 10 % TiC:

а – в – exposure time 5, 15, 30 min

- Михеев Р.С., Чернышова Т.А. Дискретно-армированные композиционные материалы системы Al – TiC (обзор). *Заготовительные производства в машиностроении*. 2008;11:44–53.
- Кулик В.И., Нилов А.С. *Композиционные материалы с металлической матрицей*. Санкт-Петербург: Балт. гос. техн. ун-т, 2020:69.
- Луц А.Р., Амосов А.П., Латухин Е.И., Рыбаков А.Д., Шигин С.В. Получение легированного композиционного материала Al – Cu – Mn – TiC с повышенными триботехническими свойствами. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2020;18(6):278–282. <http://doi.org/10.36652/1684-1107-2020-18-6-278-282>
- Амосов А.П., Луц А.Р., Латухин Е.И., Ермошкн А.А. Применение процессов СВС для получения in situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными частицами карбида титана: обзор. *Известия вузов. Цветная металлургия*, 2016;1:39–49. <http://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-39-49>.
- Курганова Ю.А. Разработка и применение дисперсно упрочненных алюмоматричных композиционных материалов в машиностроение. Автореф. дис. док. техн. наук. Москва;2008:20.
- Чернышова Т.А., Калашников И.Е., Болотова Л.К. Трибологические характеристики литых алюмоматричных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными тугоплавкими порошками. *Российские нанотехнологии*. 2011;6(1–2):135–142. <http://doi.org/10.1134/S1995078011010095>.
- Калашников И.Е. Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов. Автореф. дис. док. техн. наук. Москва;2011:22.

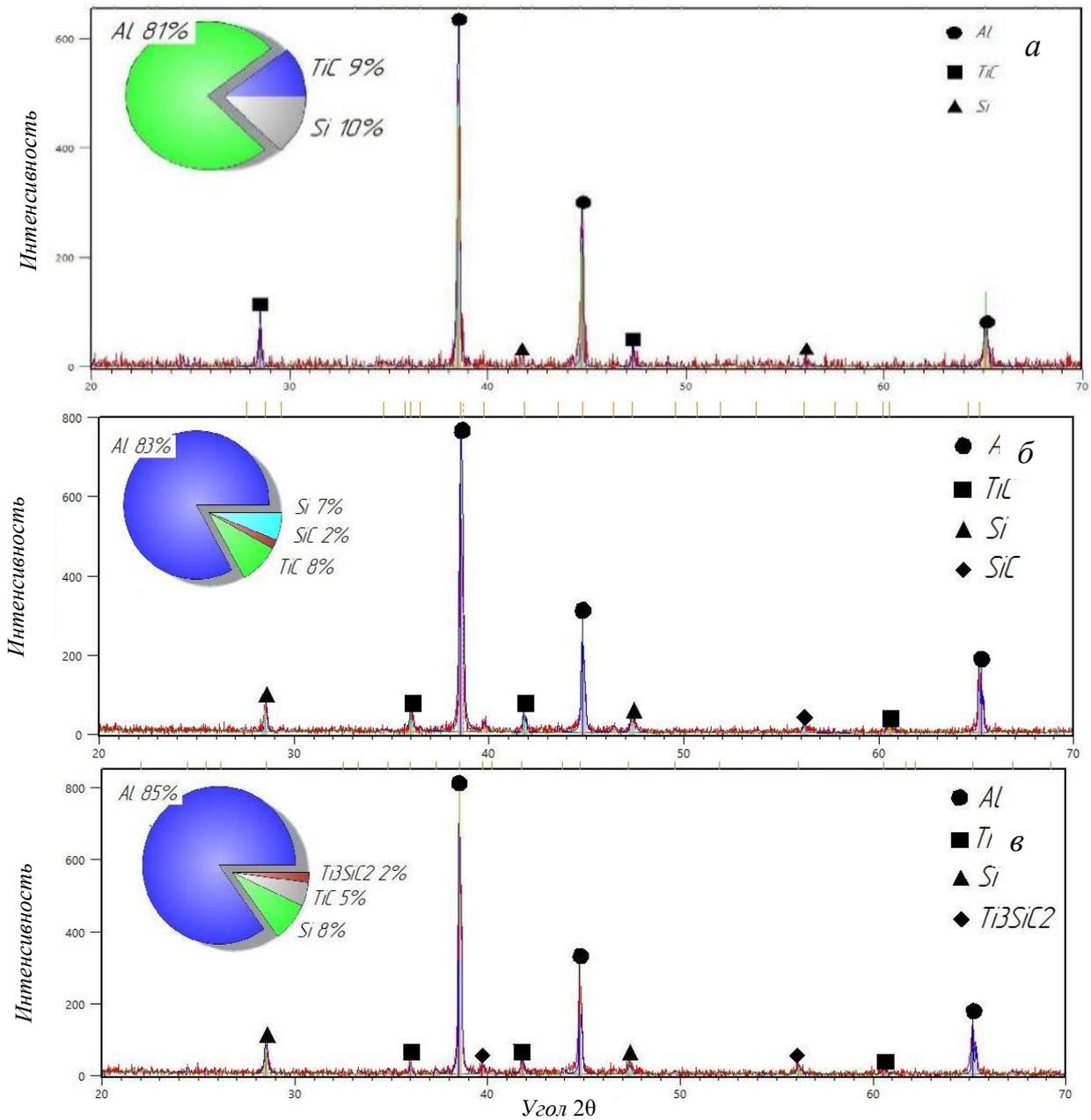


Рис. 3. РФА композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC:

a – в – время выдержки 5, 15, 30 мин

Fig. 3. RFA of composite material AK10M2N – 10 % TiC (exposure time 5 min)

a – в – exposure time 5, 15, 30 min

11. Joseph O. O., Afolalu A. S., Abioyeetal A.A. Effect of TiC addition on the mechanical properties and microstructure of Al-Si alloy. *Materials Today: Proceedings*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.544>
12. Karantzalis A.E., Lekatou A., Georgatis E., Poulas V., Mavros H. Microstructural Observations in a Cast Al – Si – Cu/TiC Composite. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19(4):585–590. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9505-8>
13. Zhang M, Huo Y., Ma L., Huang B., Hu Q. In SituTiC Ceramic Particles Locally Reinforced Al – Si Matrix Composites Prepared by SHS-Casting Method from the Al – Si – Ti – C System. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2013;11(4):723–731. <https://doi.org/10.1111/ijac.12097>
14. Guo R.-F., Wang Y., Ma Y.-H., Shen P. Role of Si in the wetting of TiC by Al. *Journal of Materials Science*. 2020;2. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05496-4>
15. López V.H., Scoles A., Kennedy A.R. The thermal stability of TiC particles in an Al 7wt.% Si alloy / V.H. López, A. Scoles, A.R. Kennedy. *Materials Science and Engineering: A*. 2002;356(1-2): 316–325. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00143-6](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00143-6)

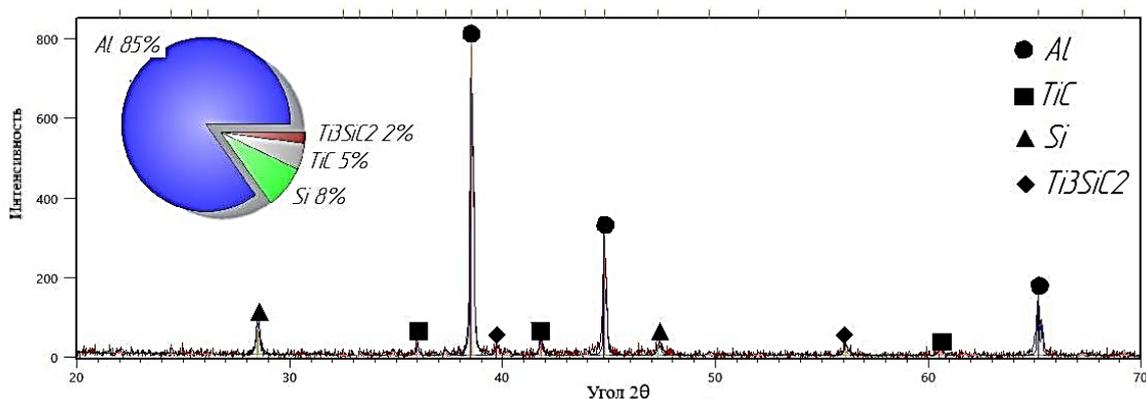


Рис. 4. Изменение фазового состава композиционного материала в зависимости от времени выдержки
Fig. 4. Change in the phase composition of the composite material depending on the exposure time

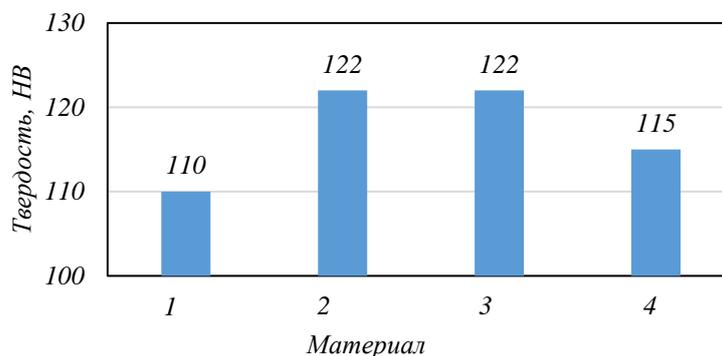


Рис. 5. Изменение твердости композиционных материалов:
1 – АК10М2Н; 2 – АК10М2Н – 10 % TiC; 3 – АК10М2Н – 8 % TiC – 2 % SiC; 4 – АК10М2Н – 5 % TiC – 2 % Ti₃SiC₂
Fig. 5. Change in hardness of composite materials:
1 – АК10М2Н; 2 – АК10М2Н – 10 % TiC; 3 – АК10М2Н – 8 % TiC – 2 % SiC; 4 – АК10М2Н – 5 % TiC – 2 % Ti₃SiC₂

16. Xia F., Liang M.X., Gao X.S., Guo Y.C., Li J.P., Yang W., Zhang Z.K. Instability of in situ TiC particles in an Al–12Si. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11361–11369. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.063>.
17. Ding H., Liu X. Influence of Si on stability of TiC in Al melts. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21(7):1465–1472. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)60882-0](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)60882-0)
18. Луц А.Р., Шерина Ю.В., Амосов А.П., Минаков Е.А., Ибатуллин И.Д. Выбор термической обработки и исследование ее влияния на структуру и свойства композиционного материала АК10М2Н – 10 % TiC, полученного методом СВС в расплаве. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2024;30(2):30–43. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-30-43>
19. Шерина Ю.В., Луц А.Р., Ибатуллин И.Д. Разработка композиционного материала на основе сплава АК10М2Н и исследование его триботехнических свойств. *Научные технологии в машиностроении*. 2022;2(128):11–16. <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-2-11-16>.
20. Рыбаков А.Д. Применение различных форм углерода для СВС высокодисперсного карбида титана в расплаве при получении алюмоматричных композиционных материалов. Автореф. дис. канд. техн. наук. Самара, 2021:18.
21. Амосов А.П., Латухин Е.И., Умеров Э.Р. Применение процессов инфильтрации и самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения керметов: обзор. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021;27(6):52–75. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-6-52-75>
22. Шерина Ю.В. Влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана, синтезированной в расплаве, и термообработки на структуру и свойства промышленных алюминиевых сплавов. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Самара, 2024:20.
23. Шерина Ю.В., Луц А.Р. Влияние термической обработки на свойства композиционных материалов АМг2 – 10 % TiC и АМг6 – 10 % TiC, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. *Frontier Materials & Technologies*. 2024;1: 105–112. <https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-1-67-10>

24. Шерина Ю.В. Исследование влияния добавки высокодисперсной фазы карбида титана, синтезированной в расплаве, и термообработки на структуру и свойства сплава АМ4,5Кд. *Транспортное машиностроение*. 2024;3:59–59. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-3-59-69>
25. Vishnuvardhan Reddy D., Salonica Sravani P., Deepthi N. The investigation of mechanical and metallurgical properties on Al7075-TiC-SiC reinforced hybrid composites by stir casting. *International Journal of Mechanical and Production*, 2019;9:769–776. <https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201976>.
26. Каченюк М.Н., Сметкин А.А., Андраковская К.Э. Влияние условий механоактивации и консолидации на формирование композиционного материала Ti_3SiC_2/TiC . *Современные проблемы науки и образования*, 2014;2.
- REFERENCES**
1. Belov N.A. *Phase composition of aluminum alloys*. Moscow: MISIS, 2009:234. (In Russ.).
 2. Rafal'skii I.V. *Resource-saving synthesis of aluminum-based alloys using dispersed non-metallic materials and intelligent methods for controlling metallurgical processes for their production*. Minsk: BNT, 2016:209. (In Russ.).
 3. Kurbatkina E.I., Kosolapov D.V., Khodykin L.D., Nigmatov M.S. Study of the influence of silicon additive on the phase composition of aluminum composite materials reinforced with silicon carbide particles. *Trudy VIAM*. 2014;6:35–38. (In Russ.). <http://doi.org/10.1186/s40712-014-0012-9>
 4. Mikheev R.S., Chernyshova T.A. Discretely reinforced composite materials of the Al – TiC system (review). *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2008;11:44–53. (In Russ.).
 5. Kulik V.I., Nilov A.S. Composite materials with a metal matrix: a manual. Saint-Petersburg: Balt. gos. tekhn. un-t, 2020:69. (In Russ.).
 6. Luts A.R., Amosov A.P., Latukhin E.I., Rybakov A.D., Shigin S.V. Production of alloyed composite material Al – Cu – Mn – TiC with improved tribotechnical properties. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2020;18(6):278–282. (In Russ.). <http://doi.org/10.36652/1684-1107-2020-18-6-278-282>.
 7. Amosov A.P., Luts A.R., Latukhin E.I., Ermoshkin A.A. Application of SHS processes for in situ fabrication of aluminomatrix composites discretely reinforced with nanosized titanium carbide particles: a review. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*, 2016;1:39–49. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-39-49>
 8. Kurganova Yu.A. Development and application of dispersion-hardened aluminum matrix composite materials in mechanical engineering. Avtoref. dis. dok. tekhn. nauk. Moscow;2008:20. (In Russ.).
 9. Chernyshova T.A., Kalashnikov I.E., Bolotova L.K. Tribological characteristics of cast aluminum matrix composite materials modified with nanoscale refractory powders. *Rossiiskie nanotekhnologii*. 2011;6(1-2):135–142. (In Russ.). <http://doi.org/10.1134/S1995078011010095>.
 10. Kalashnikov I.E. *Development of methods for reinforcing and modifying the structure of aluminum matrix composite materials*. Avtoref. dis. dok. tekhn. nauk. Moscow;2011:428. (In Russ.).
 11. Joseph O.O., Afolalu A.S., Abioyeetal A.A. Effect of TiC addition on the mechanical properties and microstructure of Al-Si alloy. *Materials Today: Proceedings*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.544>.
 12. Karantzalis A.E., Lekatou A., Georgatis E., Poulas V., Mavros H. Microstructural Observations in a Cast Al-Si-Cu/TiC Composite. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2010;19 (4):585–590. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9505-8>.
 13. Zhang M, Huo Y., Ma L., Huang B., Hu Q. In Situ TiC Ceramic Particles Locally Reinforced Al-Si Matrix Composites Prepared by SHS-Casting Method from the Al-Si-Ti-C System. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2013;11(4):723–731. <https://doi.org/10.1111/ijac.12097>.
 14. Guo R.-F., Wang Y., Ma Y.-H., Shen P. Role of Si in the wetting of TiC by Al. *Journal of Materials Science*. 2020;2. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05496-4>.
 15. López V.H., Scoles A., Kennedy A.R. The thermal stability of TiC particles in an Al 7 wt. % Si alloy. *Materials Science and Engineering: A*. 2002;356(1–2):316–325. [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00143-6](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00143-6).
 16. Xia F., Liang M. X., Gao X. S., Guo Y. C., Li J. P., Yang W., Zhang Z. K. Instability of in situ TiC particles in an Al-12Si. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(5):11361–11369. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.063>.
 17. Ding H., Liu X. Influence of Si on stability of TiC in Al melts. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2011;21(7):1465–1472. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(11\)60882-0](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(11)60882-0).
 18. Luts A.R., Sherina Yu.V., Amosov A.P., Minakov E.A., Ibatullin I.D. Selection of heat treatment and study of its influence on the structure and properties of composite material AK10M2N-10%TiC obtained by the SHS method in the melt. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2024;30(2):30–43. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2024-2-30-43>
 19. Sherina Yu.V., Luts A.R., Ibatullin I.D. Development of a composite material based on the AK10M2N alloy and study of its tribotechnical properties. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*. 2022;2(128):11–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2022-2-11-16>

20. Rybakov A.D. *Application of various forms of carbon for SHS of highly dispersed titanium carbide in the melt in the production of aluminum matrix composite materials*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Samara, 2021:18. (In Russ.).
21. Amosov A.P., Latukhin E.I., Umerov E.R. Application of infiltration and self-propagating high-temperature synthesis processes to produce cermets: review. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya*. 2021;27(6):52–75.
<https://doi.org/10.17073/0021-3438-2021-6-52-75>
22. Sherina Yu.V. *Effect of reinforcement with highly dispersed phase of titanium carbide synthesized in the melt and heat treatment on the structure and properties of industrial aluminum alloys*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. Samara, 2024:20. (In Russ.).
23. Sherina Yu.V., Luts A.R. The influence of heat treatment on the properties of composite materials AMg2 – 10 % TiC and AMg6 – 10 % TiC obtained by the method of self-propagating high-temperature synthesis. *FrontierMaterials&Technologies*. 2024;1:105–112.
<https://doi.org/10.18323/2782-4039-2024-1-67-10>
24. Sherina Yu.V. Study of the influence of the addition of highly dispersed phase of titanium carbide synthesized in the melt and heat treatment on the structure and properties of the alloy AM4, 5Kd. *Transportnoe mashinostroenie*. 2024;3:59–59.
<https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-3-59-69>
25. Vishnuvardhan Reddy D., Salonica Sravani P., Deepthi N. The investigation of mechanical and metallurgical properties on Al7075-TiC-SiC reinforced hybrid composites by stir casting. *International Journal of Mechanical and Production*, 2019;9:769–776.
<https://doi.org/10.24247/ijmperdapr201976>
26. Kachenyuk M.N., Smetkin A.A., Andrakovskaya K.E. The influence of mechanical activation and consolidation conditions on the formation of Ti₃SiC₂/TiC composite material. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*, 2014;2.

Сведения об авторах:

Юлия Владимировна Шерина, аспирант кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов, Самарский государственный технический университет

E-mail: yulya.makhonina.97@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-5451-7107

Альфия Расимовна Луц, к.т.н., доцент кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов, Самарский государственный технический университет
E-mail: alya_luts@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7889-9931

Дмитрий Васильевич Закамов, к.т.н., доцент кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов, Самарский государственный технический университет
E-mail: zeus65@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9520-5671

Information about the authors:

Yulia V. Sherina, postgraduate student of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University
E-mail: yulya.makhonina.97@inbox.ru
ORCID: 0000-0002-5451-7107

Alfiya R. Luts, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University
E-mail: alya_luts@mail.ru
ORCID: 0000-0001-7889-9931

Dmitriy V. Zakamov, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy, Powder Metallurgy, Nanomaterials, Samara State Technical University
E-mail: zeus65@mail.ru
ORCID: 0000-0001-9520-5671

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

Поступила в редакцию 29.08.2024
После доработки 17.10.2024
Принята к публикации 23.10.2024

Received 29.08.2024
Revised 17.10.2024
Accepted 23.10.2024