

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. №4 (178). С. 3-11.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. №4 (178). P. 3-11.

Научная статья

УДК 669

doi: 10.30987/2223-4608-2026-2-3-11

Получение МАХ-фазы методом СВС из элементных порошков в расплаве промышленного алюминиевого сплава АК10М2Н

Юлия Владимировна Шерина¹, к.т.н.

Эмиль Ринатович Умеров², к.т.н.

Андрей Дмитриевич Качура³, инженер

^{1, 2, 3} Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

¹ yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5451-7107>

² umeroff2017@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2050-6899>

³ ruw223@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9246-5638>

Аннотация. Представлены результаты исследования возможности формирования МАХ-фазы состава Ti_3SiC_2 из элементных порошков с применением метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в расплаве алюминиевого промышленного сплава АК10М2Н. Проведенный комплекс структурно-фазовых исследований (микроструктурный, микрорентгеноспектральный и рентгенофазовый анализы) показал в структуре алюминиевого сплава АК10М2Н после синтеза наличие армирующих частиц различной морфологии (пластинчатой, игольчатой и глобулярной формы). Элементный состав, полученный в результате МРСА, позволяет предположить наличие фаз состава Ti_3SiC_2 , Al_2Si , TiC , SiC , Al_3Ti , Al_4C_3 . Проведенный рентгенофазовый анализ показывает возможность получения композиционного материала АК10М2Н- Ti_3SiC_2 с применением метода СВС, однако, следует отметить, что количество формируемой жидкофазным методом МАХ-фазы значительно меньше рассчитанной (1 % масс. вместо введенных 5 % масс.). Также значительное влияние на формирование МАХ-фазы оказывает время выдержки расплава под зеркалом алюминия, так при выдержке 5 мин фаза Ti_3SiC_2 присутствует в количестве 1 % масс., а также наблюдается присутствие фазы карбида титана в количестве 1 % масс. и чистого кремния. Увеличение времени выдержки под зеркалом алюминия до 30 мин приводит к деградации фазы Ti_3SiC_2 на карбид титана (2 % масс.) и карбид кремния (3 % масс.), также в составе наблюдается присутствие чистого кремния. Так, после выдержки 5 мин фактический состав композиционного материала представляет собой АК10М2Н – 1 % Ti_3SiC_2 – 1 % TiC , а после выдержки 30 мин – АК10М2Н – 2 % TiC – 3 % SiC . Исследование физических свойств показало возможность получения композиционных материалов с минимальной пористостью (0...1 %) и невысоким удельным весом, однако показатели твердости синтезированных АМКМ несколько ниже, чем у матричного сплава, что может оказать положительное влияние на пластичность материалов.

Ключевые слова: карбосилицид титана, алюминий, самораспространяющийся высокотемпературный синтез

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту № 24-79-10187.

Для цитирования: Шерина Ю.В., Умеров Э.Р., Качура А.Д. Исследование возможности получения МАХ-фазы методом СВС в расплаве промышленного алюминиевого сплава АК10М2Н // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 4 (178). С. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-3-11

Obtaining of the MAX-phase using SHS technology for elemental powders in a liquid alloy of industrial aluminum ASi10Cu2Ni

Yulia V. Sherina¹, Ph.D. Eng.

Emil R. Umerov², Ph.D. Eng.

Andrey D. Kachura³, Engineer

^{1, 2, 3} Samara State Technical University, Samara, Russia

¹ yulya.makhonina.97@inbox.ru

² umeroff2017@yandex.ru

³ ruw223@mail.ru

Abstract. The results of a study of MAX phase generation for Ti_3SiC_2 from elemental powders using the method of self-propagating high-temperature synthesis in a liquid alloy of industrial aluminum ASi10Cu2Ni are presented. A complex of structural and phase studies (microstructural, microrentgenospectral, and X-ray phase analyses) showed the presence of reinforcing particles of various morphologies (lamellar, needle-shaped, and globular) in the structure of the ASi10Cu2Ni aluminum alloy after synthesis. The elemental composition obtained as a result of MRSA suggests the presence of such phases of the composition as Ti_3SiC_2 , Al_2Si , TiC , SiC , Al_3Ti , Al_4C_3 . The X-ray phase analysis shows the possibility of obtaining the composite material ASi10Cu2Ni, Ti_3SiC_2 using the SHS method, however, it should be noted that the amount of MAX phase generated due to the liquid-phase method is significantly less than the calculated one (1 % WT instead of the introduced 5 % WT). The holding time of the liquid-alloy under the aluminum mirror also has a significant effect on the obtaining of the MAX phase, i.e. when held for 5 minutes, the Ti_3SiC_2 phase is present in an amount of 1 % WT, while the titanium carbide phase in an amount of 1 % WT is also observed together with pure silicon. An increase in the exposure time under the aluminum mirror to 30 minutes results in the degradation of the Ti_3SiC_2 phase into titanium carbide (2 % WT) and silicon carbide (3 % WT), while the presence of pure silicon is also observed in the composition. Thus, if holding time is 5 minutes, the actual composition of the composite material is ASi10Cu2Ni – 1 % Ti_3SiC_2 – 1 % TiC , when it is 30 minutes – ASi10Cu2Ni – 2 % TiC – 3 % SiC . The study of physical properties has shown the possibility of obtaining composite materials with minimal porosity (0,1 %) and low specific gravity, however, the hardness values of synthesized AMCM are slightly lower than those of the matrix alloy, which can have a positive effect on the plasticity of the materials.

Keywords: titanium carbosilicide, aluminum, self-propagating high-temperature synthesis (SHS)

Acknowledgments: the material was prepared as part of scientific research under project No. 24-79-10187.

For citation: Sherina Yu.V., Umerov E.R., Kachura A.D. Obtaining of the MAX phase using SHS technology for elemental powders in a liquid alloy of industrial aluminum ASi10Cu2Ni / Science intensive technology in mechanical engineering. 2026. № 4 (178). P. 3–11. doi: 10.30987/2223-4608-2026-4-3-11

Введение

Промышленные алюминиевые сплавы, включая АК10М2Н, широко используются в машиностроении, авиации и других отраслях за счет их легкости и коррозионной стойкости. Однако, для повышения их прочности и эксплуатационных характеристик требуется модифицирование структуры, например, за счет внедрения частиц МАХ-фаз. МАХ-фазы представляют собой керамические материала сложного состава, например, Ti_3SiC_2 , Ti_3AlC_2 и т.д., обладающих уникальным сочетанием металлических и керамических свойств, таких как: высокая термостойкость, коррозионная

стойкость, а также хорошая электро- и теплопроводность. Учеными Самарского государственного технического университета была показана возможность получения методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) МАХ-фаз состава Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC_2 из элементных порошков на воздухе или в засыпке из песка [1]. Средняя пористость синтезированных каркасов составляла 50...60 %, что послужило началом последующих исследований для создания керметов путем самопроизвольной инфильтрации расплавами металлов в созданные ранее каркасы их МАХ-фаз. В работах [2, 3] была показана возможность получения керметов систем

Al – Ti₃SiC₂, Sn – Ti₃SiC₂, Cu – Ti₃SiC₂, Al – Ti₃AlC₂, Sn – Ti₃AlC₂ и Cu – Ti₃AlC₂ методом СВС с самопроизвольной инфильтрацией расплавов металлов, обладающих повышенными значениями предела прочности, однако сопровождающееся значительным падением пластичности.

Следовательно, актуальной задачей материаловедения становится получение композиционных материалов, армированных МАХ-фазой, но в значительно меньшем количестве, для сохранения уровня пластичности. Ключевой проблемой введения МАХ-фазы «ex-situ» может стать проблема смачиваемости МАХ-фазы расплавом алюминия, ввиду образования пассивных слоев на поверхности МАХ-фаз [4]. В тоже время отмечается, что композиты, полученные методами in-situ, характеризуются полным отсутствием загрязнения армирующих частиц и их отличной смачиваемостью расплавом матрицы [5 – 7]. В работах [8 – 11] показана возможность формирования МАХ-фазы состава Ti₃SiC₂ в расплаве алюминия при избытке кремния и формировании фазы карбида титана, за счет деградации фазы TiC с увеличением времени выдержки, однако, исследований по формированию МАХ-фазы в расплаве алюминиевых сплавов из элементных порошков проведено не было. Применение метода СВС для формирования фазы Ti₃SiC₂ непосредственно в расплаве [12], в свою очередь, перспективно своей энергоэффективностью, простотой технологического исполнения, а также чистотой готового продукта. На основании полученных данных целью данной работы было поставлено синтезировать МАХ-фазу состава Ti₃SiC₂ из элементных порошков титана, углерода и кремния, методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в расплаве промышленного алюминиевого сплава АК10М2Н.

Материалы и методы

Для проведения исследований в качестве шихтовых материалов были выбраны порошок

титана ТПП-7 (ТУ1715-449-05785388), порошок углерода П-701 (ГОСТ 7585-86), порошок кремния КР0 (ГОСТ 2169-69), Na₂TiF₆ (ТУ 6-09-01-425-77) и алюминиевый сплав АК10М2Н (ГОСТ 30620-98). Шихту смешивали в соотношении 7,35 г Ti + 1,43 г Si + 0,12г С + 0,5 г Na₂TiF₆ и вводили в расплав АК10М2Н массой 190 г, что соответствует соотношению композиционного материала АК10М2Н – 5 %Ti₃SiC₂. Методика получения дисперсно армированных композиционных материалов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в расплаве приведена в работах [13, 14]. Изготовление металлографических шлифов проводили на шлифовально-полировальной машине ПОЛИЛАБ П12МА с приставкой для работы в автоматическом режиме. Для выявления микроструктуры проводили травление образцов раствором 50 % HF + 50 % HNO₃ в течение 10...15 с. Металлографический анализ осуществляли на растровом электронном микроскопе Jeol JSM-6390А. Фазовый состав анализировался методом рентгенофазового анализа (РФА). Съемка рентгеновских спектров – на автоматизированном дифрактометре марки ARL X'trA (Thermo Scientific) с использованием Cu-излучения при непрерывном сканировании в интервале углов от 20 до 80 ° со скоростью 2 град/мин. Анализ дифрактограмм проводился с использованием программы «HighScore Plus». Определение плотности проводилось методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018-74.

Расчет действительной пористости производился по измеренной плотности по формуле $P = 1 - (\rho_3/\rho_T)$. Твердость полученных экспериментальных образцов определяли на твердомере ТШ-2М по ГОСТ 9012-59.

Результаты

На рис. 1 приведены микроструктуры полученного композиционного материала после выдержки 5 мин.

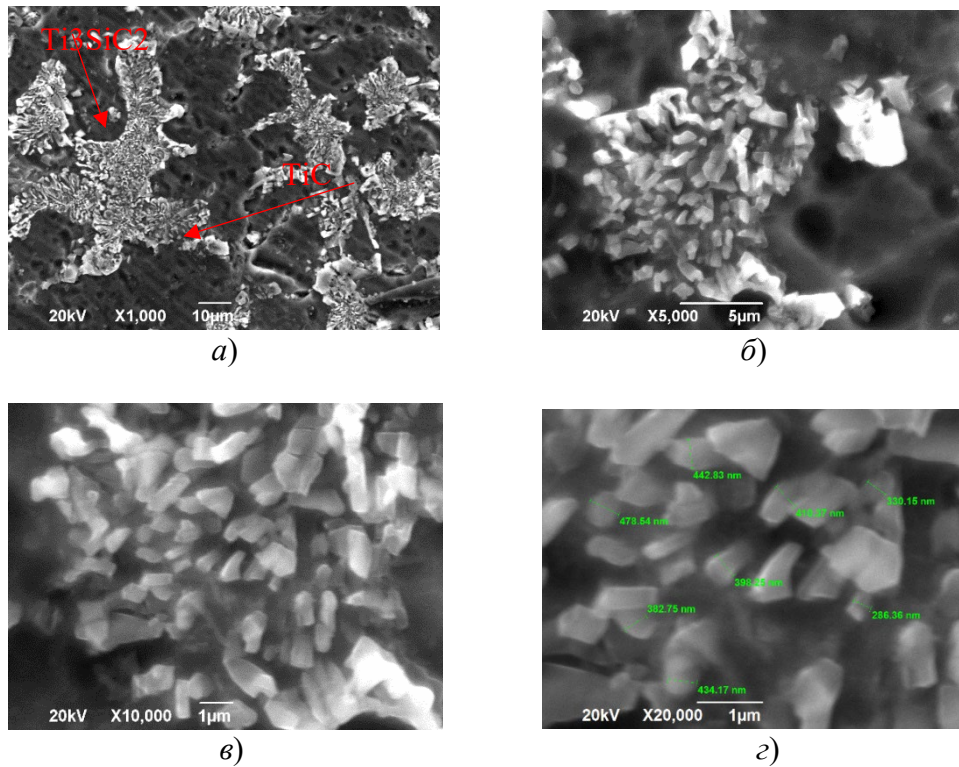


Рис. 1. Микроструктура композиционного материала AK10M2H – 5 % Ti_3SiC_2 , время выдержки 5 мин

Fig. 1. Microstructure of composite material ASi10Cu2Ni – 5 % Ti_3SiC_2 , holding time is 5 min

Результаты микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) композита AK10M2H – 5 %

Ti_3SiC_2 после выдержки 5 мин приведены на рис. 2 и в табл. 1.

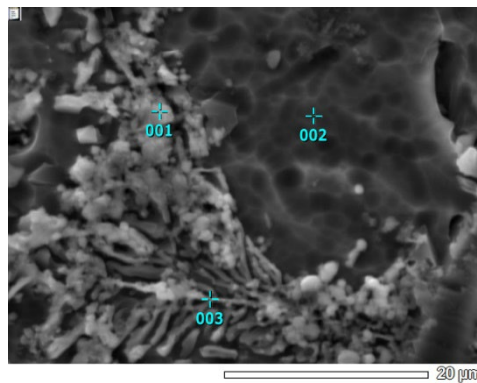


Рис. 2. МРСА композиционного материала AK10M2H – 5 % Ti_3SiC_2 , время выдержки 5 мин

Fig. 2. MRSA composite material ASi10Cu2Ni – 5 % Ti_3SiC_2 , holding time 5 min

1. Результаты микрорентгеноспектрального анализа (МРСА)

1. Results of microrentgenospectral analysis (MRSA)

Номер маркера	Содержание элемента, % масс.				
	Al	Ti	C	Si	O
001	41,38	4,92	2,39	50,28	1,03
002	100,00	-	-	-	-
003	65,81	6,71	-	25,39	2,09

Для определения точного фазового состава был проведен рентгенофазовый анализ

(РФА), результаты которого приведены на рис. 3.

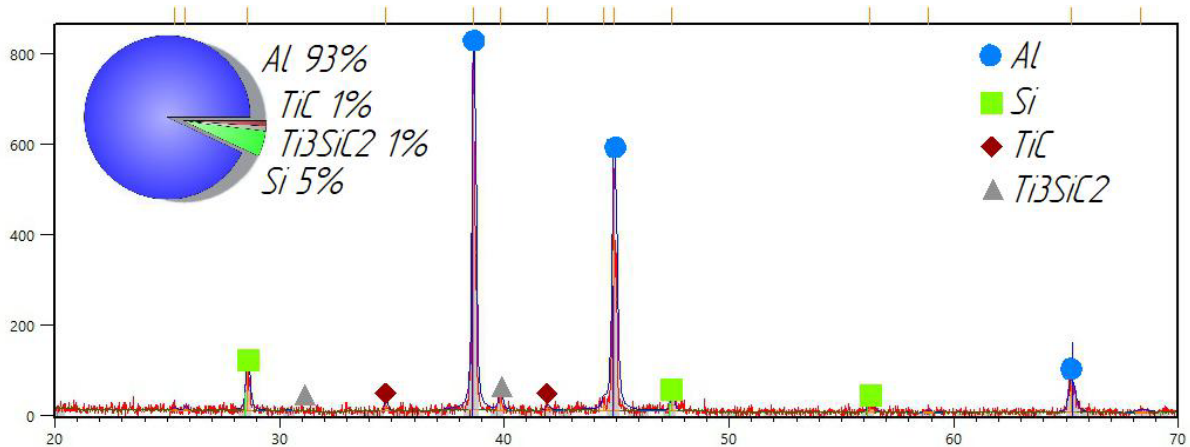


Рис. 3. РФА композиционного материала АК10М2Н – 5 % Ti₃SiC₂, время выдержки 5 мин

Fig. 3. XRF of composite material ASi10Cu2Ni – 5 % Ti₃SiC₂, holding time is 5 min

Микроструктуры полученного композиционного материала после выдержки 30 мин приведены на рис. 4.

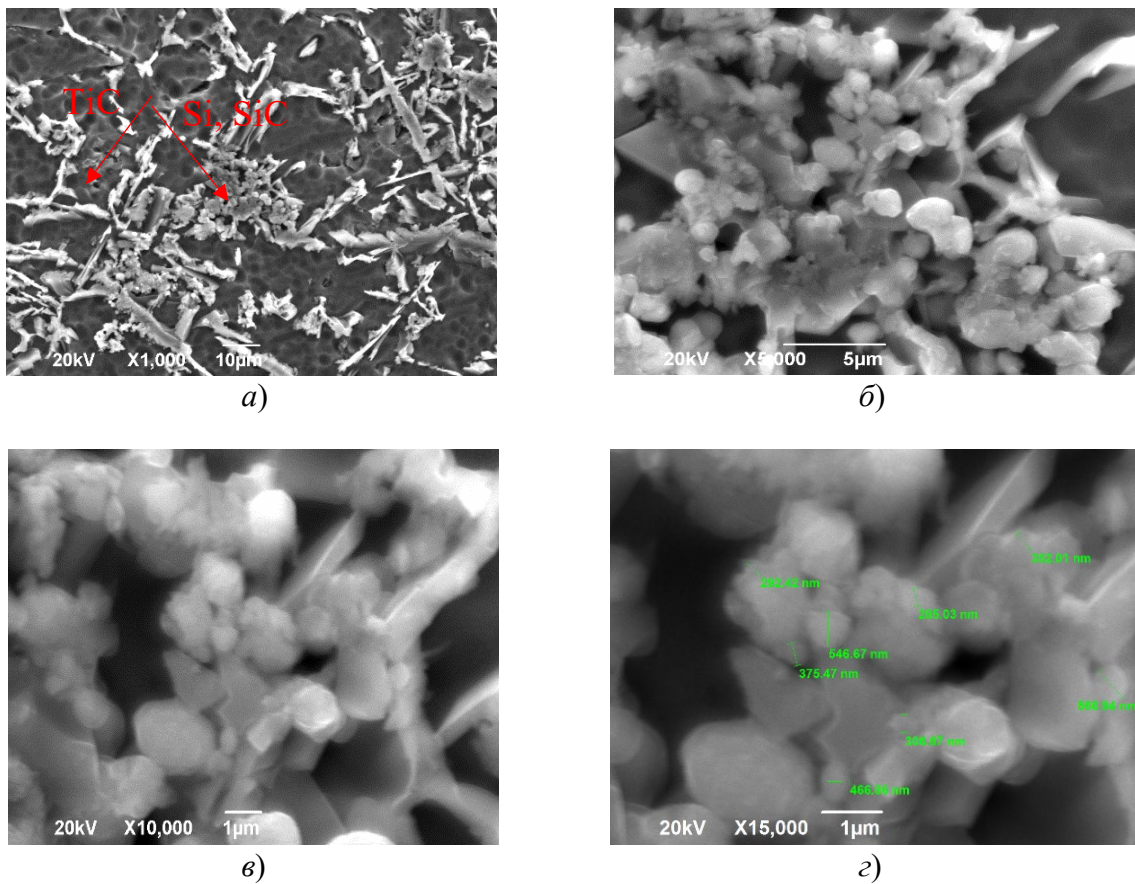


Рис. 4. Микроструктура композиционного материала АК10М2Н – 5 % Ti₃SiC₂, время выдержки 30 мин

Fig. 4. Microstructure of composite material ASi10Cu2Ni – 5 % Ti₃SiC₂, holding time is 30 min

Результаты МРСА композита АК10М2Н – 5 % Ti_3SiC_2 после выдержки 30 мин приведены на рис. 5.

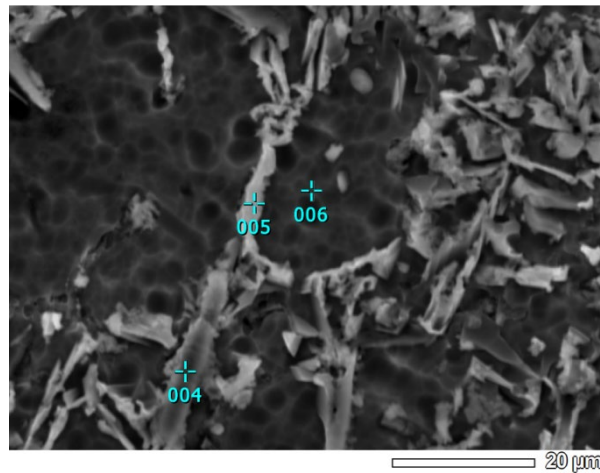


Рис. 5. МРСА композиционного материала АК10М2Н – 5 % Ti_3SiC_2 , время выдержки 30 мин

Fig. 5. MRSA composite material ASi10Cu2Ni – 5 % Ti_3SiC_2 , holding time is 30 min

2. Результаты микрорентгеноспектрального анализа (МРСА)

2. Results of microrentgenospectral analysis (MRSA)

Номер маркера	Содержание элемента, % масс.			
	Al	Ti	Si	C
004	50,61	39,74	8,95	0,70
005	59,04	8,14	29,72	3,10
006	97,88	0,16	1,30	0,66

Для определения точного фазового состава был проведен РФА, результаты которого приведены на рис. 6.

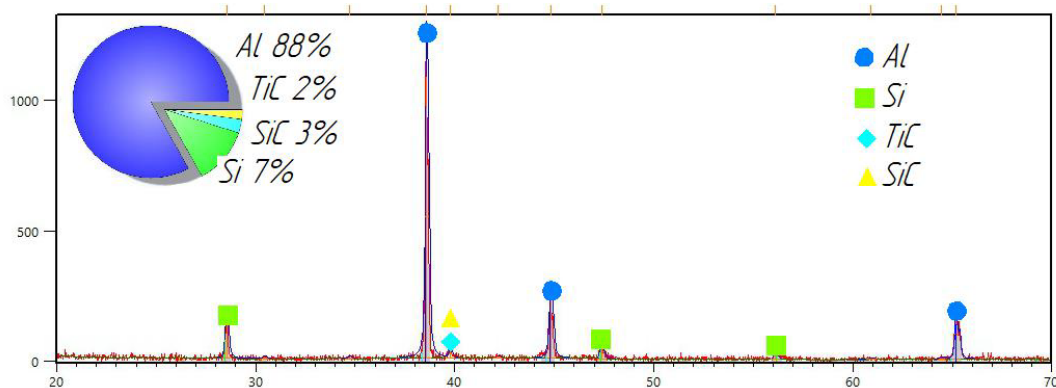


Рис. 6. РФА композиционного материала АК10М2Н – 5 % Ti_3SiC_2 , время выдержки 30 мин

Fig. 6. X-ray diffraction analysis of the composite material АК10М2Н – 5 % Ti_3SiC_2 , holding time 30 min.

Физические и механические характеристики синтезированных композиционных материалов приведены в табл. 3.

3. Физические и механические свойства синтезированных композитов

3. Physical and mechanical properties of synthesized composites

Материал	Плотность теоретическая, ρ_T , г/см ³	Плотность экспериментальная, $\rho_э$, г/см ³	Пористость, %	Твердость, НВ, МПа
AK10M2H	2,7	2,7	0	1100
AK10M2H – 1 % Ti ₃ SiC ₂ – 1 % TiC	2,80	2,78	1	760
AK10M2H – 2 % TiC – 3 % SiC	2,80	2,79	1	800

Обсуждение

В работе [8] было показано, при синтезе карбида титана в расплаве АК10М2Н методом СВС увеличение времени может привести к образованию МАХ-фазы, именно поэтому исследование возможности получения Ti₃SiC₂ из элементных порошков методом СВС в расплаве АК10М2Н проводилось с варьированием времени выдержки под зеркалом алюминия – 5 и 30 мин.

На рис. 1 видно, что в алюминиевой матрице присутствуют дисперсные частицы пластинчатой формы, напоминающие по своей морфологии карбосилицид титана, а также небольшое количество глобулярных частиц, которые могут являться карбидом титана. Размер частиц находится в диапазоне от 290 до 480 нм, что позволяет отнести их к высокодисперсным. Предположительно, по результатам МРСА на рис. 2, могут присутствовать фазы Ti₃SiC₂, Al₂Si, TiC, SiC, Al₃Ti, Al₄C₃. Согласно полученным данным на рис. 3, помимо МАХ-фазы Ti₃SiC₂ в количестве 1 % масс., присутствует еще чистый кремний – 5 % масс. и карбид титана – 1 % масс. Таким образом, выдержка в течение 5 мин обеспечивает формирование МАХ-фазы в расплаве, однако в значительно меньшем количестве, чем было введено (1 % вместо 5 %).

После увеличения времени выдержки до 30 мин наблюдалась иная морфология армирующих частиц, что отражено на рис. 4. Видно, что в алюминиевой матрице также, как и после выдержки в 5 мин, присутствуют дисперсные частицы, однако, их форма меняется с

пластинчатой на игольчатую, а также наблюдаются глобулярные частицы, что может являться следствием деградации фазы Ti₃SiC₂ на составляющие TiC и SiC. Размер частиц находится в диапазоне от 290 до 570 нм, что позволяет отнести их к высокодисперсным. Предположительно, по результатам МРСА на рис. 5, могут присутствовать фазы Ti₃SiC₂, Al₂Si, TiC, SiC, Al₃Ti, Al₄C₃. Согласно полученным результатам РФА на рис. 6, целевой фазы карбосилицида титана в составе композита не наблюдается, что может говорить о том, что выдержка в течение 30 мин. обеспечивает распад МАХ-фазы на составляющие TiC и SiC.

Согласно результатам табл. 3 экспериментальная плотность близка к рассчитанной, а пористость обоих материалов не превышает 1 %, что также подтверждается снимками микроструктуры. Плотность композиционных материалов несколько выше плотности матричного сплава, что связано с наличием армирующих фаз, плотность которых составляет 3,21 г/см³ (SiC), 4,52 г/см³ (Ti₃SiC₂) и 4,92 г/см³ (TiC). Снижение твердости, по сравнению с матричным сплавом, объясняется аномальной «мягкостью» карбосилицида титана [15], а также наличием небольшой пористости в композиционном материале.

Выводы

Таким образом, проведенное исследование показывает возможность получения МАХ-фазы Ti₃SiC₂ методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза из элементных порошков титана, кремния и углерода

в расплаве промышленного алюминиевого сплава АК10М2Н. Однако, важно отметить, что получить заложенное при расчетах шихты содержание карбосилицида титана не удалось, вместо 5 % масс. в композиционном материале наблюдается всего 1 % масс. Следует также отметить, что большое влияние оказывает время выдержки расплава под зеркалом алюминия, так, при выдержке 5 мин удается синтезировать МАХ-фазу в расплаве в сочетании с фазой карбида титана в соотношении 1:1, а увеличение выдержки с 5 до 30 мин приводит к деградации МАХ-фазы на составляющие TiC и SiC.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Давыдов Д.М., Амосов А.П., Латухин Е.И., Умеров Э.Р., Новиков В.А. Особенности состава и микроструктуры пористых каркасов МАХ-фаз Ti_3AlC_2 и Ti_3SiC_2 , получаемых методом СВС на воздухе и в защитной оболочке из песка // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2023. № 4 (64). С. 88–97.
2. Умеров Э.Р., Латухин Е.И., Амосов А.П. Получение керметов с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза керамических каркасов TiC, Ti_3SiC_2 , Ti_3AlC_2 и последующей самопроизвольной инфильтрации расплавами металлов Al, Sn, Cu // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы и технологии в авиадвигателестроении» г. Самара. 2023. Т. 1. С. 204–210.
3. Амосов А.П., Латухин Е.И., Умеров Э.Р., Давыдов Д.М. Исследование возможности получения длинномерных образцов МАХ-кермета Ti_3AlC_2 – Al методом СВС с самопроизвольной инфильтрацией расплавом алюминия // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2022. Т. 16. № 3. С. 24–36.
4. Гутема Е.М. Разработка технологии получения алюминиевых сплавов, армированных карбидокремневыми частицами. Санкт-Петербург. 2019. 103 с.
5. Wang F., Li J., Shi C., Zhao N., Liu E., He C., He F. Preparation and mechanical properties of in-situ synthesized nanoMgAl₂O₄ particles and Mg_xAl_(1-x)B₂ whiskers co-reinforced Al matrix composites // Materials Science Engineering A. 2018. № 735. P. 236–242.
6. Duygulu O. High-resolution transmission electron microscopy investigation of in situ TiC / Al composites // Metals and Materials International. 2018. № 56. P. 265–275.
7. Qu X., Wang F., Shi C., Zhao N., Liu E., He C., He F. In situ synthesis of a gamma-Al₂O₃ whisker reinforced aluminium matrix composite by cold pressing and

sintering // Materials Science Engineering. 2018. № 709. P. 223–231.

8. Шерина Ю.В., Луц А.Р., Закамов Д.В. Исследование влияния кремния на стабильность фазы TiC при получении композиционного материала АК10М2Н – 10TiC методом СВС // Вестник сибирского индустриального университета. 2025. № 1 (51). С. 25–34.

9. Lopez V.H., Scoles A., Kennedy A.R. The thermal stability of TiC particles in an Al // Materials Science and Engineering: A. 2002. № 356. P. 316–325.

10. 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 // Journal of Materials Research and Technology. 2020. № 9 (5). P. 11361–11369.

11. Ding H., Liu X. Influence of Si on stability of TiC in Al melts // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. № 21 (7). P. 1465–1472.

12. Луц А.Р., Шерина Ю.В., Амосов А.П., Качура А.Д. Жидкофазное получение методом СВС и термическая обработка композитов на основе алюминиево-магниевого сплава, упрочненных высокодисперсной фазой карбида титана // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2023. Т. 29. № 4. С. 70–86.

13. Луц А.Р., Макаренко А.Г. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез алюминиевых сплавов: монография. М.: Машиностроение, 2008. 175 с.

14. Шерина Ю.В., Луц А.Р. СВС-армирование промышленных алюминиевых сплавов высокодисперсной фазой карбида титана: монография. Самара: СГТУ. 2025. 151 с.

15. Каченюк М.Н., Сметкин А.А., Андраковская К.Э. Влияние условия механоактивации и консолидации на формирование композиционного материала Ti_3SiC_2 / TiC // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12618> (дата обращения: 08.09.2025).

REFERENCES

1. Davydov D.M., Amosov A.P., Latukhin E.I., Umerov E.R., Novikov V.A. Features of the composition and microstructure of porous skeletons of max-phases Ti_3AlC_2 and Ti_3SiC_2 produced by shs method in AIR and in a protective shell of sand // Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2023. No. 4 (64). pp. 88–97.
2. Umerov E.R., Latukhin E.I., Amosov A.P. Production of cermets using self-propagating high-temperature synthesis of ceramic skeletons TiC, Ti_3SiC_2 , Ti_3AlC_2 and subsequent spontaneous infiltration by melts of metals Al, Sn, Cu // Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference «Advanced materials and technologies in aircraft engine building» Samara. 2023. Vol. 1. pp. 204–210.
3. Amosov A.P., Latukhin E.I., Umerov E.R., Davydov D.M. Investigation of possibility of fabrication of

long-length samples of Ti3AlC2-ALMAX-CERMET by the shs method with spontaneous infiltration by aluminum melt // Izvestia vusov. Powder metallurgy and functional coatings. 2022. Vol. 16. No. 3. pp. 24–36.

4. Gutema E.M. Development of technology for the production of aluminum alloys reinforced with silicon carbide particles. Saint Petersburg. 2019. 103 p.

5. Wang F., Li J., Shi C., Zhao N., Liu E., He C., He F. Preparation and mechanical properties of in-situ synthesized nanoMgAl₂O₄ particles and Mg_xAl_(1-x)B₂ whiskers co-reinforced Al matrix composites // Materials Science Engineering A. 2018. № 735. P. 236–242.

6. Duygulu O. High-resolution transmission electron microscopy investigation of in situ TiC / Al composites // Metals and Materials International. 2018. № 56. P. 265–275.

7. Qu X., Wang F., Shi C., Zhao N., Liu E., He C., He F. In situ synthesis of a gamma-Al₂O₃ whisker reinforced aluminium matrix composite by cold pressing and sintering // Materials Science Engineering. 2018. № 709. P. 223–231.

8. 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 Industrial University. 2025. No. 1 (51). pp. 25–34.

Lopez V.H., Scoles A., Kennedy A.R. The thermal stability of TiC particles in an Al // Materials Science and Engineering: A. 2002. № 356. P. 316–325.

10. 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 // Journal of Materials Research and Technology. 2020. № 9 (5). P. 11361–11369.

11. Ding H., Liu X. Influence of Si on stability of TiC in Al melts // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2011. № 21 (7). P. 1465–1472.

12. Lutz A.R., Sherina Yu.V., Amosov A.P., Kachura A.D. Liquid matrix SHS manufacturing and heat treatment of Al–Mg composites reinforced with fine titanium carbide // Izvestia vusov. Non-ferrous metallurgy. 2023. Vol. 29. No. 4. pp. 70–86.

13. Lutz A.R., Makarenko A.G. Self-propagating high-temperature synthesis of aluminum alloys: monograph. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 175 p.

14. Sherina Yu.V., Lutz A.R. SHS-reinforcement of industrial aluminum alloys with a highly dispersed titanium carbide phase: monograph. Samara: SGTU. 2025. 151 p.

15. Kachenjuk M.N., Smetkin A.A., Andrakovskaya K.E. The influence of mechanical activation and consolidation conditions on the formation of Ti₃SiC₂ / TiC composite material // Modern problems of science and education. 2014. No. 2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=12618> (date of access: 09/08/2025).

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 08.10.2025; одобрена после рецензирования 17.11.2025; принята к публикации 12.12.2025.

The article was submitted 08.10.2025; approved after reviewing 17.11.2025; assepted for publication 12.12.2025.