

Оригинальная статья

УДК 669.017

DOI: 10.57070/2304-4497-2023-4(46)-30-38

**ОЦЕНКА МОДИФИЦИРУЮЩЕГО ЭФФЕКТА ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ
КАРБИДА ТИТАНА, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СВС В СОСТАВЕ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

© 2023 г. А. Р. Луц, Ю. В. Шерина, И. Ю. Тимошкин

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

Аннотация. Модифицирование зеренной структуры алюминиевых сплавов с целью повышения их физико-механических свойств является актуальной задачей современного материаловедения. Одним из наиболее перспективных методов модифицирования является введение в состав сплавов высокодисперсных керамических частиц в качестве модификаторов второго рода. Однако в традиционных условиях литейного производства реализовать их механическое замешивание достаточно сложно, так как частицы склонны к агломерированию, а также происходит попутное насыщение расплава нежелательными газообразными продуктами и примесями. В связи с этим особую актуальность приобретает метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), который позволяет получать фазы высокой дисперсности непосредственно в расплаве из исходных элементных порошков микронных размеров. Это позволяет обойти закупку дорогостоящих наноразмерных прекурсоров, а также сократить энергозатраты и время получения готового продукта. Представлены результаты СВС высокодисперсной фазы карбида титана (размером 110 – 300 нм) в количестве 10 % (по массе) в составе широко применяемых промышленных алюминиевых сплавов разных систем (АМг2, АМг6, АМ4,5Кд, АК10М2Н, Д16 и В95). Показано, что метод СВС обеспечивает получение и равномерность распределения керамической фазы по объему матрицы. Оценка твердости доказывает, что наличие карбида титана позволяет добиться более высоких значений в сравнении с матричными сплавами. Проведена оценка модифицирующего эффекта от присутствия частиц карбидной фазы, по результатам которой выявлено, что достигается измельчение зерна матрицы в 2 – 7 раз. Это приводит, согласно произведенным расчетам и экспериментальным данным, к повышению прочности на 15 – 40 МПа и твердости на 8 – 42 НВ. Методом СВС керамической фазы карбида титана в составе промышленных алюминиевых сплавов является перспективным методом модифицирования зеренной структуры материала.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, карбид титана, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, композиционный материал, модифицирование

Для цитирования: Луц А.Р., Шерина Ю.В., Тимошкин И.Ю. Оценка модифицирующего эффекта высокодисперсной фазой карбида титана, полученной методом СВС в составе алюминиевых сплавов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;(4(46)):30–38. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-30-38](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-30-38)

Original article

**EVALUATION OF THE MODIFYING EFFECT OF HIGHLY DISPERSED TITANIUM
CARBIDE PHASE OBTAINED BY THE SHS METHOD IN ALUMINUM ALLOYS**

© 2023 A. R. Luts, Yu. V. Sherina, I. Yu. Timoshkin

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

Abstract. Modification of the grain structure of aluminum alloys in order to improve their physical and mechanical properties is an urgent task of modern materials science. One of the most promising methods of modification is the introduction of highly dispersed ceramic particles into the composition of alloys as modifiers of the second kind.

However, in traditional conditions of foundry production it is rather difficult to realize their mechanical mixing, as the particles are prone to agglomeration, and also there is a concomitant saturation of the melt with undesirable gaseous products and impurities. In this connection, the method of self-propagating high-temperature synthesis (SHS), which makes it possible to obtain high-dispersity phases directly in the melt from micron-sized elemental powders. This makes it possible to bypass the purchase of expensive nanoscale precursors, as well as to reduce energy consumption and time to obtain the final product. The results of SHS of highly dispersed phase of titanium carbide (size 110 – 300 nm) in the amount of 10 % (by mass) in the composition of widely used industrial aluminum alloys of different systems (AMg2, AMg6, AM4,5Kd, AK10M2N, D16 and B95) are presented. It is shown that the SHS method provides obtaining and uniformity of ceramic phase distribution over the matrix volume. Hardness evaluation proves that the presence of titanium carbide allows to achieve higher values in comparison with matrix alloys. The modifying effect of the presence of carbide phase particles has been evaluated, and the results show that matrix grain refinement by 2–7 times is achieved. This leads, according to calculations and experimental data, to an increase in strength by 15–40 MPa and hardness by 8–42 NV. The method of SHS of ceramic phase of titanium carbide in the composition of industrial aluminum alloys is a promising method of modifying the grain structure of alloys.

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

For citation: Luts A.R., Sherina Yu.V., Timoshkin I.Yu. Evaluation of modifying effect of highly dispersed phase of titanium carbide obtained by SHS in aluminum alloys. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;4(46):30–38. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4\(46\)-30-38](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-4(46)-30-38)

Введение

Анализ многочисленных публикаций, посвященных проблеме повышения качества большинства алюминиевых литейных сплавов, показал, что доминирующим направлением в теории и практике литейных процессов остается модифицирование структуры. Модифицированием называется введение в расплавленные металлы и сплавы модификаторов, небольшие количества которых резко влияют на кристаллизацию (вызывают округление или измельчение структурных составляющих без изменения их распределения) [1]. В настоящее время теория модифицирования недостаточна разработана, многие ее положения являются спорными. Поэтому отсутствует единая классификация примесного модифицирования и модификаторов. Наиболее распространенным является примесное модифицирование, которое подходит для всех видов литья. Следует отметить существенные недостатки примесного модифицирования: отсутствие универсальности модификаторов; их экологическая небезопасность; относительно малое время «живучести». Отмечается, что наиболее перспективным и экономически выгодным является модифицирование керамическими частицами [2].

В настоящее время для измельчения зерна в слитках алюминиевых сплавов применяют в основном прутковые модифицирующие лигатуры на основе систем Al – Ti – B и Al – Ti – C, содержащие керамические частицы TiB₂, TiC. В работе [3] показано, что зерноизмельчающий эффект от добавления лигатуры Al – 3Ti – 0,15C превосходит тот же эффект от добавления лигатуры Al – 5Ti – 1B при условии одинакового их

расхода. В работах [4, 5] было исследовано влияние добавления 1 % (объем.) TiC в алюминиевый сплав 7075. После синтеза наночастиц в расплаве зерна матрицы очистились от крупных дендритов (от 100 мкм) до мелких равноосных (не более 20 мкм). Как показывает производственный опыт, не всегда удается получить мелкозернистую и однородную структуру по всему объему слитка при использовании рассматриваемых лигатур. Причины кроются как в качестве самих лигатур, так и в технологии введения их в расплав. Сложившаяся ситуация свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования процесса модифицирования алюминиевых сплавов.

В работе [6] исследовано влияние порошков TiC и TiB₂ на структуру зерна сплава Al – 4,5 % Cu. Наноструктурные лигатуры получали в три этапа: синтез нанопорошков карбида и диборида титана методом механоактивации и их брикетирование; отработка методики введения брикетов в расплав алюминия; получение слитков лигатурных сплавов. Исследование структуры показало, что в сплаве Al – 4,5 % Cu – 0,6 % TiC наблюдается переход от направленной к объемной кристаллизации, формируется однородная равноосная структура (зерна около 50 мкм), в сравнении с исходным размером порядка 200 мкм, что приводит к повышению твердости в 1,5 раза.

Одним из эффективных путей воздействия на структуру литейных сплавов алюминия системы Al – Si является их модифицирование тугоплавкими керамическими частицами [7 – 11]. В работе [12] показана возможность измельчения зерен матрицы промышленного алюминиевого

сплава марки АК7 путем введения тугоплавких наноразмерных частиц $\text{TiC} - \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Однако следует отметить, что получение наноразмерных порошков является сложным и дорогостоящим процессом, а также при введении их в расплав следует решить проблему смачиваемости керамических частиц расплавом алюминия. В работе [13] сплав А356 ($\text{Al} - \text{Si}$) был модифицирован частицами TiC . Сначала наночастицы подвергали механохимической активации совместно с алюминиевым порошком, далее на активированные частицы воздействовали горячей экструзией в самодельном экструдере и вводили в жидкий сплав $\text{Al} - \text{Si}$. Сравнение микроструктуры и механических свойств полученного модифицированного сплава со свойствами материала без наночастиц показало, что размер зерна модифицированного сплава уменьшился в 2 раза.

В последние годы отмечено большое количество исследований, посвященных разработке композитов на основе алюминиевой матрицы. Это связано со следующими свойствами рассматриваемых материалов: высокие удельная прочность, модуль упругости, сопротивление износу, жесткость и другие. Наиболее широкое применение находят композиты на основе алюминиевой матрицы с керамическими упрочняющими фазами, полученные методами СВС [14, 15]. Синтез композиционных материалов с существенно большим количеством керамической фазы, чем это требуется только для модифицирования, приводит к измельчению зерна. В работе [16] показано, что в композите $\text{Al} - 3,5\% \text{TiC}$ размер зерна алюминиевой матрицы удалось понизить до 20 – 35 мкм, а в композите $\text{Al} - 4\% \text{TiB}_2$ – до 10 – 20 мкм, в сравнении с исходным размером зерна от 70 мкм.

В работе [17] показана возможность модифицирования промышленного сплава АМг5 путем введения частиц диборида титана в количестве 3 % в расплав матрицы лигатурным методом, а также осуществлен расчет вклада от эффекта измельчения зерна (закон Холла-Петча) в увеличение механических характеристик сплава по формуле:

$$\Delta\sigma_{GR} = k_y \left(D^{-\frac{1}{2}} - D_0^{-\frac{1}{2}} \right), \quad (1)$$

где k_y – параметр Холла-Петча (примерно 68 МПа·м^{1/2}); D – средний размер зерна материала с добавлением лигатуры; D_0 – средний размер зерна сплава в исходном состоянии.

По выражению (1) ожидаемый прирост прочности составил 9,63 МПа. Кроме того, был рассчитан эффект упрочнения от влияния механизма Орована по формуле:

$$\sigma_{load} = 0,5V_p\sigma_m, \quad (2)$$

где V_p – объемное содержание частиц; σ_m – предел текучести матрицы.

По выражению (2) ожидаемый прирост прочности составил 8,4 МПа.

На основании полученных данных в настоящей работе была поставлена цель оценить модифицирующий эффект высокодисперсной фазы карбида титана, полученной методом СВС, в составе алюминиевых промышленных сплавов разного состава.

Методы и принципы исследования

Композиционные материалы получали методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза по схеме, описанной в работе [18]. В качестве матриц использовали промышленные алюминиевые сплавы АМг2 (ГОСТ 21631 – 76), АМг6 (ГОСТ 4784 – 97), АМ4,5Кд (ГОСТ 1583 – 93), АК10М2Н (ГОСТ 30620 – 98), Д16 (ГОСТ 4784 – 2019) и В95 (ГОСТ 4784 – 2019). В качестве шихты использовали порошки титана марки ТПП-7 (ТУ 1791-449-05785388 – 2010), углерода П-701 (ГОСТ 7885 – 86) и галогидной соли Na_2TiF_6 (ТУ 6-09-01-425 – 77). Микроструктурный анализ выполняли при помощи растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6390A. Оценка размера зерна матричных сплавов и композиционных материалов проводили путем обработки электронных изображений с использованием анализатора SIAMS 800. Для анализа количества и равномерности распределения армирующей фазы по объему матрицы использовали программы Micro-S Polar и Doublealloys [18, 19]. Твердость исследовали на твердомере ТШ-2М (ГОСТ 9012 – 59).

Основные результаты

Первоначально при помощи программы «Micro-S Polar» была проведена оценка количественного содержания целевой фазы карбида титана, а также оценена анизотропия синтезированных материалов (рис. 1). По результатам исследований выявлено, что во всех композиционных материалах количество целевой армирующей фазы TiC находится в пределах 8 – 10 %. Также путем анализа анизотропии показано, что свойства композитов во всех направлениях одинаковы.

Для изучения равномерности распределения керамической фазы по объему матрицы при помощи программы «Doublealloys» были преобразованы изображения, полученные на растровом электронном микроскопе и расставлены точки (рис. 2). Оценку равномерности распределения керамической фазы по объему матрицы проводили с использованием метода А.А. Глаголева.

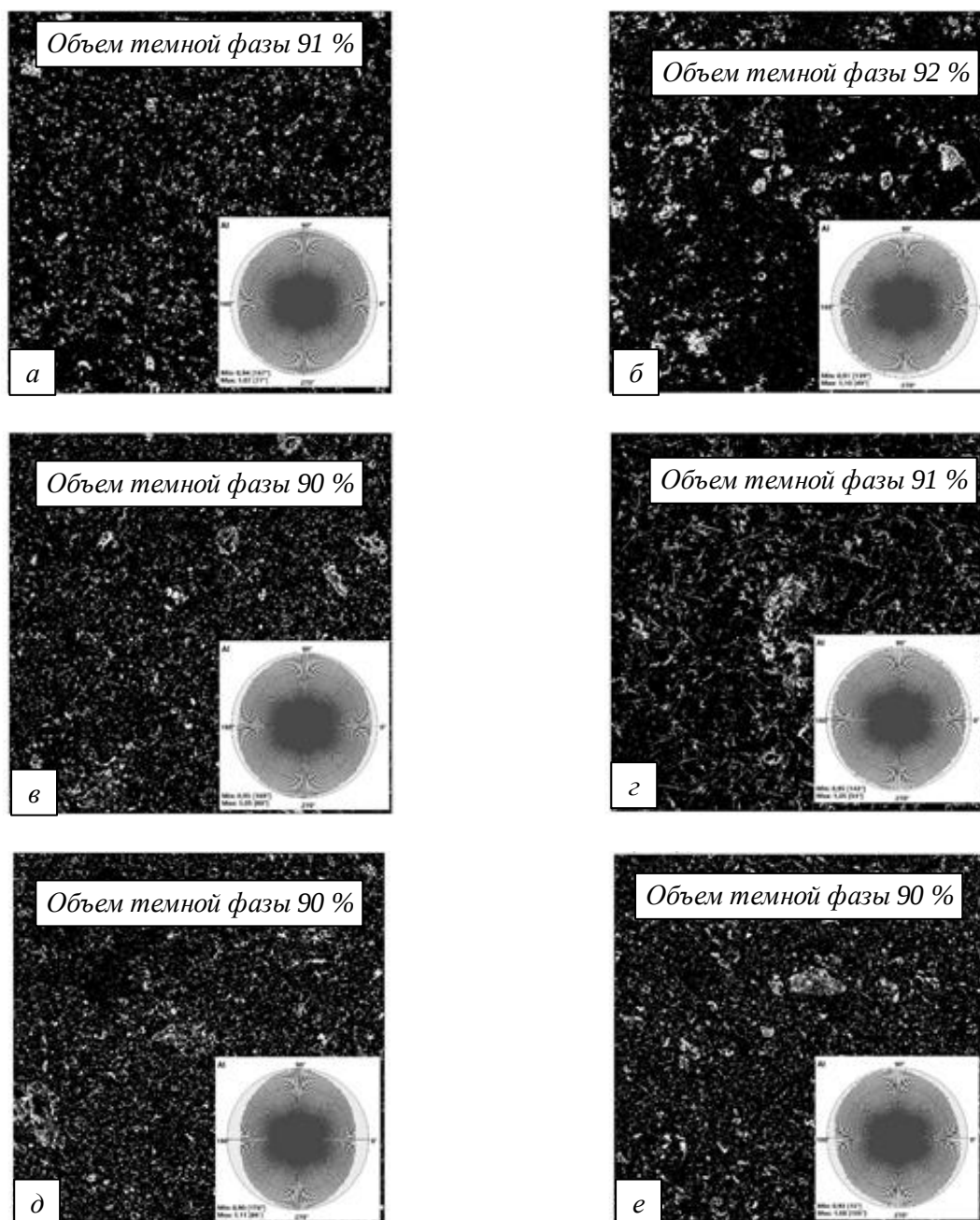


Рис. 1. Количественный анализ наличия керамической фазы TiC в расплаве матрицы AMr2 – 10 % TiC (a); AMr6 – 10 % TiC (б); AM4,5Kd – 10 % TiC (в); AK10M2H – 10 % TiC (г); D16 – 10 % TiC (д); B95 – 10 % TiC (е)
 Fig. 1. Quantitative analysis of the presence of TiC in the matrix melt of AMg2 – 10 % TiC (a); AMg6 – 10 % TiC (б); AM4,5Kd – 10 % TiC (в); AK10M2H – 10 % TiC (г); D16 – 10 % TiC (д); B95 – 10 % TiC (е)

Для этого полученные изображения были разделены на девять равных частей, в трех из которых проводили подсчет точек, попадающих на темную область (фаза TiC). Расчет выполняли с использованием следующих формул:

$$П_1 = П_{\phi} + \frac{1}{2} П_{\text{кас}}; \quad (3)$$

$$П_2 = N_i - П_1; \quad (4)$$

$$V_{\phi} = (П_1/П_2) \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где $П_{\phi}$ – число точек, попавших на зерно фазы TiC; $П_{\text{кас}}$ – число точек, попавших на границу двух фаз; N_i – общее количество точек.

Полученные данные (табл. 1 подтверждают равномерность распределения керамической фазы по объему матрицы, так как показатель V_{ϕ} во всех областях не отличается более, чем на единицу.

В табл. 2 приведены результаты оценки модифицирующего эффекта на размер зерна матрицы в присутствии керамической фазы карбида титана. Размер зерен измерялся при помощи структурного анализатора электронных изображений SIAMS 800, расчет ожидаемого прироста

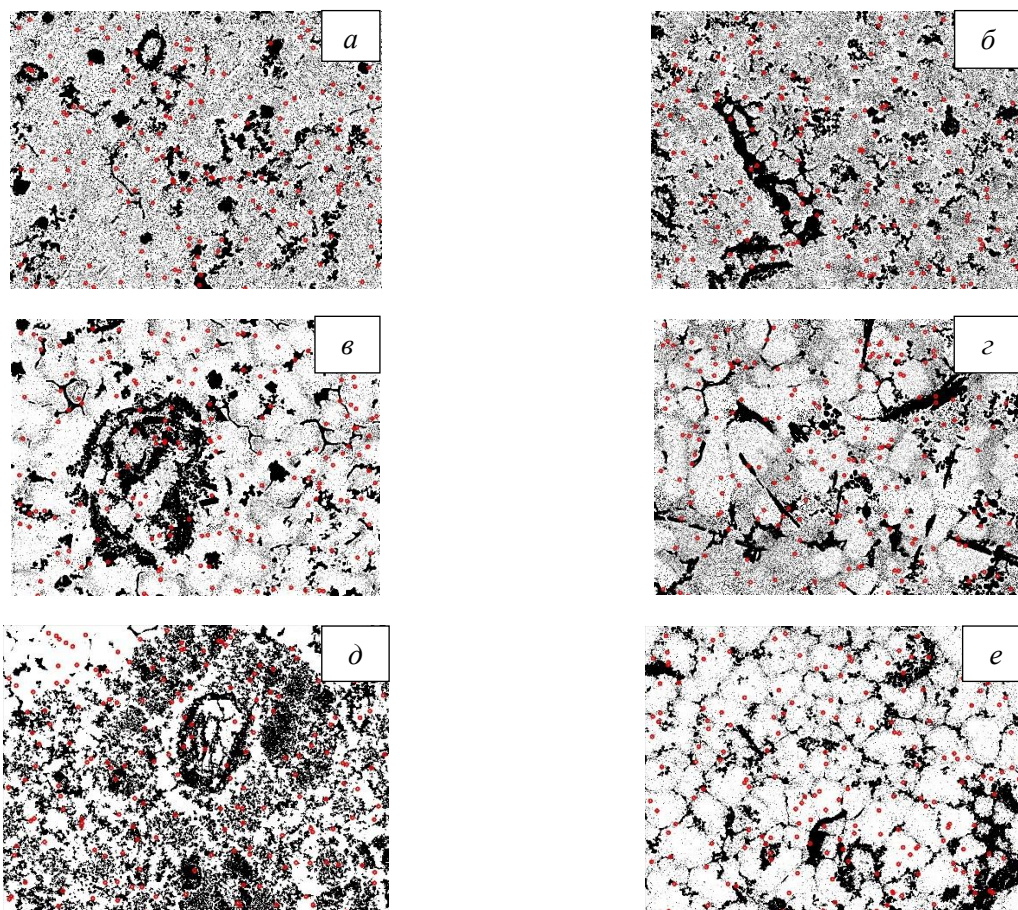


Рис. 2. Микроструктуры композиционных материалов (АМг2 – 10 % TiC (а); АМг6 – 10 % TiC (б); АМ4,5Кд – 10 % TiC (в); АК10М2Н – 10 % TiC (г); Д16 – 10 % TiC (д); В95 – 10 % TiC (е)) с нанесенными точками для анализа распределения керамической фазы TiC методом А.А. Глаголева

Fig. 2. Microstructures of composite materials (AMg2 – 10 % TiC (a); AMg6 – 10 % TiC (б); AM4.5Kd – 10 % TiC (в); AK10M2H – 10 % TiC (г); D16 – 10 % TiC (д); B95 – 10 % TiC (е)) with applied dots for analyzing the distribution of ceramic phase TiC by the method of A.A. Glagolev

прочности проводили на основании работы [17]. По результатам исследований очевидно, что во всех композиционных материалах наблюдается эффект модифицирования. Следует отметить, что наибольшее влияние наблюдается в образцах композита АМг2 – 10 % TiC размер зерна матрицы удастся уменьшить в 7 раз, а ожидаемый прирост прочности составляет примерно 40 МПа.

Распределение твердости, полученной экспериментально, представлено на рис. 3. Прирост твердости композиционных материалов на основе АМг2 составляет 8,5 НВ, на АМг6 – 7,9 НВ, на АМ4,5Кд – 14,8 НВ, на АК10М2Н – 42 НВ, на Д16 – 12 НВ, на В95 – 22 НВ. Таким образом, наибольший прирост твердости наблюдается у образцов композите АК10М2Н – 10 % TiC.

Т а б л и ц а 1

Результаты оценки равномерности распределения армирующей фазы по объему матрицы
Table 1. Results of evaluation of uniformity of reinforcing phase distribution over the matrix volume

Сплав	Общее количество точек	Π ₁			Π ₂			V _ф , %		
		1	2	3	1	2	3	1	2	3
АМг2 – 10 % TiC	200	8,5	10	7,5	191,5	190	192,5	4,5	5,3	3,9
АМг6 – 10 % TiC	200	12,5	10	12	187,5	190	188	6,7	5,3	6,4
АМ4,5Кд – 10 % TiC	200	9	7	7,5	191	193	192,5	4,7	3,6	3,9
АК10М2Н – 10 % TiC	200	11	12	10	189	188	190	5,8	6,1	5,3
Д16 – 10 % TiC	200	8	4,5	6	192	195,5	194	4,2	2,3	3,1
В95 – 10 % TiC	200	7	8,5	7	193	191,5	193	3,6	4,4	3,6

Оценка эффекта модифицирования
Table 2. Evaluation of the modification effect

Сплав	Средний размер зерна, мкм	$\Delta\sigma_{GR}$, МПа	σ_{load} , МПа
АМг2 литой	9,64	34,7	5
АМг2 – 10 % TiC	1,31		
АМг6 литой	15,8	4,1	11
АМг6 – 10 % TiC	10,6		
АМ4,5Кд литой	29,9	8,2	15
АМ4,5Кд – 10 % TiC	10,8		
АК10М2Н литой	19,5	0,7	14
АК10М2Н – 10 % TiC	19,0		
Д16 литой	31,0	2,7	16
Д16 – 10 % TiC	20,0		
В95 литой	26,3	2,1	20
В95 – 10 % TiC	20,2		

Выводы

По результатам проведенного исследования методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в расплаве получены новые композиционные материалы (АМг2 – 10 % TiC; АМг6 – 10 % TiC; АМ4,5Кд – 10 % TiC; АК10М2Н – 10 % TiC; Д16 – 10 % TiC; В95 – 10 % TiC). Проведены количественный анализ и оценка равномерности распределения керамической фазы в образцах. Выявлено, что введение керамической фазы карбида титана способствует измельчению зерна матрицы во всех образцах, кроме АК10М2Н – 10 % TiC. Это связано с наличием в нем крупных колоний кремния. На основе данных о размере зерен рассчитана предполагаемая степень упрочнения по механизмам Петча-Холла и Орована от проведенного модифицирования. Приведены экспериментальные данные о повышении твердости в присутствии керамической фазы карбида титана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитин К.В. *Модифицирование и комплексная обработка силуминов*. Самара: Самарский государственный технический университет, 2016:92.
2. Марукович Е.И., Стеценко В.Ю. Повышение эффективности модифицирования. *Литье и металлургия*. 2006;2(38):151–153.
3. Рожин А. В. *Совершенствование процессов легирования и модифицирования алюминиевых сплавов на основе систем Al – Cu – Mg и Al – Zn – Mg – Cu*. Автореф. дисс. к-та техн. наук. Екатеринбург. 2013:21.
4. Zuo M., Sokoluk M., Cao Ch., Yuan J., Zheng Sh., Li. X. Microstructure Control and Performance Evolution of Aluminum Alloy 7075 by Nano-Treating. *Scientific Reports*. 2019;9(1):1–11. <http://doi.org/10.1038/s41598-019-47182-9>

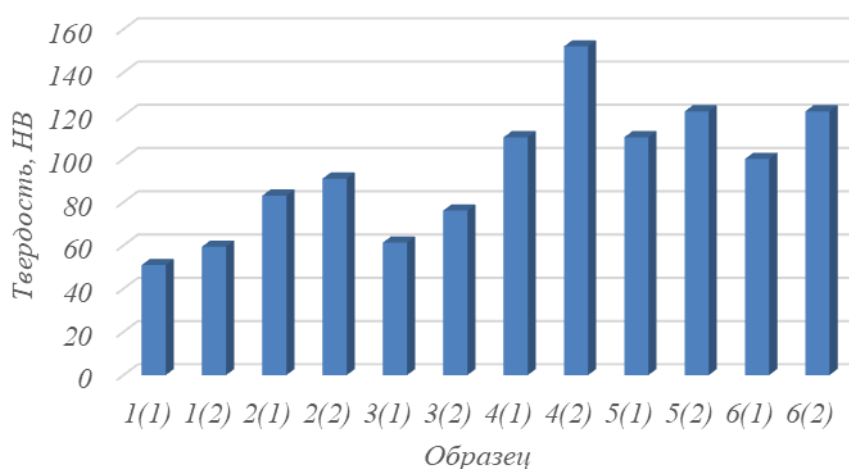


Рис. 3. Распределение твердости образцов в литом состоянии (1) и композиционных материалах (2):

1 – АМг2; 2 – АМг6; 3 – АМ4,5Кд; 4 – АК10М2Н; 5 – Д16; 6 – В95

Fig. 3. Hardness distribution of samples in cast state (1) and composite materials (2):

1 – АМг2; 2 – АМг6; 3 – АМ4,5Кд; 4 – АК10М2Н; 5 – Д16; 6 – В95

5. Chen Y.-F., Lin Y.-C. Surface modifications of Al – Zn – Mg alloy using combined EDM with ultrasonic machining and addition of TiC particles into the dielectric. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;9(209):4343–4350. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.11.013>
6. Бродова И.Г., Уймин М.А., Астафьев В.В., Котенков Е.А., Попова Т.И. Синтез алюминиевых композитов с наноразмерными частицами карбида и борида титана. *Письма о материалах*. 2013;91–94. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2013-2-91-94>
7. Das D.K., Mishra P. C., Saranjit S., Thakur R.K. Properties of ceramic-reinforced aluminum matrix composites - a review. *International Journal mechanical and Materials Engineering*. 2014;1(12):1–16. <http://doi.org/10.1186/s40712-014-0012-9>
8. Kumar Veeresh G.B., Rao C.S.P., Selvaraj N. Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites - a review. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2011;1 (10):59–91. <http://doi.org/10.4236/jmmce.2011.101005>
9. Михеев Р.С., Чернышева Т.А. *Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники*. Москва: Маска, 2013:356.
10. Feijoo I., Merino P., Pena G., Perez M.C., Cruz S., Rey P. Effect of high energy ball milling on the morphology, microstructure and properties of nano-sized TiC particle-reinforced 6005A aluminium alloy matrix composite. *Powder Technology*. 2017;321:31–43. <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.089>
11. Peng J., Yibo L., Qingjie S. Evolution of crystallographic orientation, columnar to equiaxed transformation and mechanical properties realized by adding TiCps in wire and arc additive manufacturing 2219 aluminum alloy. *Additive Manufacturing*. 2021;39:101–108. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101878>
12. Комаров А.И., Орда Д.В., Искандарова Д.О. Особенности формирования структуры и свойств силумина АК7 под воздействием нанонаполнителя TiC – Al₂O₃. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2018;4:45–51.
13. Borodianskiy K., Kossenko A., Zinigrad M. Improvement of the Mechanical Properties of Al-Si Alloys by TiC Nanoparticles. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*. 2013; 44:4948–4953 <http://doi.org/10.1007/s11661-013-1850-4>
14. Luts A.R., Amosov A.P., Ermoshkin A.A., Ermoshkin A.A., Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu. Self-propagating high-temperature synthesis of highly dispersed titanium-carbide phase from powder mixtures in the aluminum melt. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2014;55(6):606–612. <http://doi.org/10.3103/S1067821214060169>
15. Chi Y., Gong G., Zhao L., Yu H., Tian H., Du X., Chen Ch. In situ TiB₂ – TiC reinforced Fe – Al composite coating on 6061 aluminum alloy by laser surface modification. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;294:117107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117107>
16. Пантелеева А.В., Никонова Р.М. Модифицирование алюминия упрочняющими фазами TiB₂ и TiC методом СВС в расплаве. В кн.: *Труды XI Всероссийской школы-конференции молодых ученых «КоМУ-2018»*. Химическая физика и мезоскопия. Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований. 2019;65–69.
17. Жуков И.А. *Физико-химические основы технологии металломатричных композитов на основе алюминия и магния с добавками наноразмерных неметаллических частиц*. Автореф. дисс. к-та. техн. наук. Томск. 2021:26.
18. Жуков Д.В., Гиорбелидзе М.Г., Мельников А.А., Воронин С.В. Способ оценки и визуализации неоднородности микроструктуры материалов. *Технология металлов*. 2023;4:30–37. <http://doi.org/10.31044/1684-2499-2023-0-4-30-37>
19. Пат. № 2023668380 РФ. *Стереографический анализ микроструктур и построение полярных диаграмм* / Д.В. Жуков, М.Г. Гиорбелидзе; опубл. 28.08.2023, Бюл. № 9.
20. Sherina Yu.V., Luts A.R. The study of the effect of heat treatment on the properties of the AMg2 – 10 % TiC and AMg6 – 10 % TiC composite materials produced by self-propagating high-temperature synthesis. *Frontier Materials & Technologies*. 2023. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-4-70-86>

REFERENCES

1. Nikitin K.V. *Modification and complex treatment of silumins*. Samara: Samarskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet. (In Russ.).
2. Marukovich E.I., Stetsenko V.Yu. Improving the efficiency of modification. *Lit'e i metallurgiya*. 2006;2(38):151–153. (In Russ.).
3. Rozhin A.V. *Improving the processes of alloying and modifying aluminum alloys based on the Al – Cu – Mg and Al – Zn – Mg – Cu systems*. Extended abstract of candidate's thesis. Yekaterinburg. 2013:213. (In Russ.).
4. Zuo M., Sokoluk M., Cao Ch., Yuan J., Zheng Sh., Li. X. Microstructure Control and Performance Evolution of Aluminum Alloy 7075 by

- Nano-Treating. *Scientific Reports*. 2019;9(1):1–11. <http://doi.org/10.1038/s41598-019-47182-9>
5. Chen Y.-F., Lin Y.-C. Surface modifications of Al – Zn – Mg alloy using combined EDM with ultrasonic machining and addition of TiC particles into the dielectric. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;9(209):4343–4350. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.11.013>
6. Brodova I.G., Uimin M.A., Astaf'ev V.V., P.V. Kotenkov E.A. Popova, T.I. Synthesis of aluminum composites with nanoscale particles of titanium carbide and boride. Vol. 3. *Pis'ma o materialakh*. 2013;91–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2013-2-91-94>
7. Das D.K., Mishra P. C., Saranjit S., Thakur R. K. Properties of ceramic-reinforced aluminum matrix composites – a review. *International Journal mechanical and Materials Engineering*. 2014;1(12):1–16. <http://doi.org/10.1186/s40712-014-0012-9>
8. Kumar Veeresh G. B., Rao C.S.P., Selvaraj N. Mechanical and tribological behavior of particulate reinforced aluminum metal matrix composites – a review. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 2011;1(10):59–91. <http://doi.org/10.4236/jmmce.2011.101005>
9. Mikheev R.S., Chernysheva T.A. *Aluminum-matrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology*. Moscow: Moscow, 2013:356. (In Russ.).
10. Feijoo I., Merino P., Pena G., Perez M.C., Cruz S., Rey P. Effect of high energy ball milling on the morphology, microstructure and properties of nano-sized TiC particle-reinforced 6005A aluminium alloy matrix composite. *Powder Technology*. 2017;321:31–43. <http://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.07.089>
11. Peng J., Yibo L., Qingjie S. Evolution of crystallographic orientation, columnar to equiaxed transformation and mechanical properties realized by adding TiCps in wire and arc additive manufacturing 2219 aluminum alloy. *Additive Manufacturing*. 2021;39:101–108. <http://doi.org/10.1016/j.addma.2021.101878>
12. Komarov A.I., Orda D.V., Iskandarova D.O. Features of the formation of the structure and properties of silumin AK7 under the influence of the TiC-Al₂O₃ nanofill. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2018;4:45–51. (In Russ.).
13. Borodianskiy K., Kossenko A., Zinigrad M. Improvement of the Mechanical Properties of Al – Si Alloys by TiC Nanoparticles. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*. 2013; 44:4948–4953 <http://doi.org/10.1007/s11661-013-1850-4>
14. Luts A.R., Amosov A.P., Ermoshkin A.A., Ermoshkin A.A., Nikitin K.V., Timoshkin I.Yu. Self-propagating high-temperature synthesis of highly dispersed titanium-carbide phase from powder mixtures in the aluminum melt. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2014;55(6):606–612. <http://doi.org/10.3103/S1067821214060169>
15. Chi Y., Gong G., Zhao L., Yu H., Tian H., Du X., Chen Ch. In-situ TiB₂ – TiC reinforced Fe – Al composite coating on 6061 aluminum alloy by laser surface modification. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021;294:117107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117107>
16. Panteleeva A.V., Nikonova R.M. Modification of aluminum by strengthening phases TiB₂ and TiC by the method of SHS in the melt. In: *Proceedings of the XI All-Russian school-conference of Young scientists "To WHOM-2018"*. Chemical physics and mesoscopy. Izhevsk: Izhevskii institut komp'yuternykh issledovaniy. 2019; 21(1):65–69. (In Russ.).
17. Zhukov I.A. *Physico-chemical fundamentals of the technology of metal matrix composites based on aluminum and magnesium with additives of nanoscale nonmetallic particles*. Extended abstract of candidate's thesis. Tomsk. 2021:261. (In Russ.).
18. Zhukov D.V., Giorbelidze M.G., Mel'nikov A.A., Voronin S.V. A method for assessing and visualizing the heterogeneity of the microstructure of materials. *Tekhnologiya metallov*. 2023;4:30–37. (In Russ.). <http://doi.org/10.31044/1684-2499-2023-0-4-30-37>
19. Zhukov D.V., Giorbelidze M.G. Stereographic analysis of microstructures and construction of polar diagrams. Pat. RF 2023668380. *Byulleten' izobretenii*. 2023;9. (In Russ.).
20. Sherina Yu.V., Luts A.R. The study of the effect of heat treatment on the properties of the AMg2 – 10 % TiC and AMg6 – 10 % TiC composite materials produced by self-propagating high-temperature synthesis. *Frontier Materials & Technologies*. 2023. <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-4-70-86>

Сведения об авторах

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

Юлия Владимировна Шерина, аспирант кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов

териалов, Самарский государственный технический университет

E-mail: yulya.makhonina.97@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-5451-7107

Иван Юрьевич Тимошкин, к.т.н., доцент кафедры литейных и высокоэффективных технологий, Самарский государственный технический университет

E-mail: ivan-mns@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5299-2804

Information about the authors

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

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

Ivan Yu. Timoshkin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Foundry and High-Efficiency Technologies, Samara State Technical University

E-mail: ivan-mns@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5299-2804

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 16.10.2023

После доработки 20.10.2023

Принята к публикации 27.10.2023

Received 16.10.2023

Revised 20.10.2023

Accepted 27.10.2023