



Научная статья  
2.6.17 – Материаловедение (технические науки)  
УДК 536.74

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.034



## РАЗРАБОТКА ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА AM4,5Kd-10%TiC С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Альфия Расимовна Луц

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия  
alya\_luts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7889-9931>

**Аннотация.** Дисперсно армированные композиционные материалы отличаются уникальным сочетанием прочности, твердости и износостойкости, что позволяет отнести их к группе перспективных конструкционных материалов. В статье рассмотрены результаты армирования сплава AM4,5Kd методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза фазой карбида титана в количестве 10 масс.%. Показана возможность формирования в расплаве AM4,5Kd при температуре 900 °С из промышленных порошков титана и технического углерода микронных размеров частиц карбида титана с размерами от 100 нм, а также сохранения уровня дисперсности армирующей фазы и после проведения стандартной для матричного сплава термической обработки в виде закалки с 545 °С и старения при 170 °С в течение 4 ч. Методом рентгенофазового анализа определено, что содержание карбидной фазы составляет не менее 9 масс.%, а после термической обработки происходит дополнительное выделение интерметаллической  $\theta$ -фазы ( $Al_2Cu$ ) в количестве 2 масс.%. Проведен комплекс исследований физических, химических, механических и трибологических характеристик. Установлено, что полученный композиционный материал, как и матричный сплав, сохраняет высокую плотность, достаточный уровень электропроводности, стойкость к термическому расширению и коррозии, но при этом демонстрирует повышенные показатели твердости, микротвердости и прочности на сжатие с сохранением достаточного запаса пластичности. Помимо этого, при нагрузке 400Н характеризуется не менее чем трехкратным уменьшением скорости износа и коэффициента трения и повышенной более чем в полтора раза максимальной нагрузкой схватывания при сохранении уровня температурного саморазогрева. Полученные результаты позволяют рекомендовать разработанный композиционный материал AM4,5Kd-10%TiC для изготовления деталей трибосопряжений, эксплуатирующихся при повышенных нагрузках и температурах.

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

**Для цитирования:** Луц А. Р. Разработка дисперсно армированного композиционного материала AM4,5Kd-10%TiC с улучшенными трибологическими характеристиками // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 256–261. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.034. EDN: <https://elibrary.ru/CLTFWQ>.

Original article

## DEVELOPMENT OF A DISPERSED REINFORCED COMPOSITE MATERIAL AM4.5Kd-10%TiC WITH IMPROVED TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS

Alfiya R. Luts

Samara State Technical University, Samara, Russia  
alya\_luts@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7889-9931>

**Abstract.** Dispersed reinforced composite materials are distinguished by a unique combination of strength, hardness and wear resistance, which allows them to be classified as a group of promising structural materials. The article considers the results of reinforcement of the AM4.5Kd alloy by the method of self-propagating high-temperature synthesis with a titanium carbide phase in the amount of 10 wt.%. The possibility of formation in the melt of AM4.5Kd at a temperature of 900°C from industrial titanium and carbon black powders of micron-sized titanium carbide particles with sizes from 100 nm, as well as maintaining the level of dispersion is shown. The reinforcing phase and after the standard matrix alloy thermal treatment in the form of quenching at 545°C and aging at 170°C for 4 hours. By X-ray phase analysis, it was determined that the content of the carbide phase is at least 9 wt.%, and after heat treatment, an additional separation of the intermetallic  $\theta$ -phase ( $Al_2Cu$ ) occurs in the amount of 2 wt.%. A complex of studies of physical, chemical, mechanical and tribological characteristics has been carried out. It was found that the resulting composite material, like the matrix alloy, retains high density, a sufficient level of electrical conductivity, resistance to thermal expansion and corrosion, but at the same time demonstrates increased hardness, microhardness and compressive strength while maintaining a sufficient margin of plasticity. In addition, at a load of 400H, it is characterized by at least a threefold decrease

© Луц А. Р., 2025

## РАЗРАБОТКА ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА AM4, 5Kd-10%TiC С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

*in the wear rate and coefficient of friction and an increased maximum setting load by more than one and a half times while maintaining the level of temperature self-heating. The results obtained allow us to recommend the developed composite material AM4.5Kd-10%TiC for the manufacture of tribo-coupling parts operated under increased loads and temperatures.*

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

**For citation:** Luts, A. R. (2025). Development of a dispersed reinforced composite material AM4.5Kd-10%TiC with improved tribological characteristics. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 256-261. (In Russ). doi: 10/25712/ASTU.2072-8921.2025.01.034. EDN: <https://elibrary.ru/CLTFWQ>.

### ВВЕДЕНИЕ

Литые композиционные материалы на алюминиевой основе, включающие дисперсные керамические частицы, отличаются повышенными и трибологическими свойствами, что делает их перспективными для применения в автомобиле- и авиастроении [1, 2]. Однако их прочностные характеристики, особенно при повышенных температурах, остаются недостаточными, что обуславливает активные исследования ученых, которые условно можно разделить на два основных направления.

Во-первых, увеличение прочности можно реализовать за счет повышения степени дисперсности армирующей фазы до наноразмерных значений, что позволит эффективно задействовать механизмы Орована и Петча-Холла [3, 4]. Во-вторых, достигнуть упрочнения можно за счет введения легирующих элементов в состав матричного алюминия. При их небольшом количестве может наблюдаться эффект повышения смачиваемости частиц керамической фазы за счет того, что некоторые легирующие элементы (например, Mg, Mo и др.) сегрегируют на границе раздела, уменьшая ее энергию, и тем самым способствуют повышению уровня адгезии и равномерному распределению частиц по объему композиционного материала [5]. При более значительном содержании легирующих элементов вступают в действие известные традиционные механизмы – твердо-растворное и/или дисперсионное упрочнение.

Наиболее перспективным направлением является совмещение представленных технологических приемов, т.е. целесообразна разработка новых композиционных материалов на алюминиевой легированной матрице, содержащей армирующую фазу высокой дисперсности. Для осуществления этого пути необходимо тщательно подойти к выбору способа производства. Твердофазные методы изготовления, как правило, отличаются сложным аппаратурным оформлением и высокой стоимостью процессов. Поэтому более оправданным является применение жидкофазных способов, самый распространенный из которых – метод механического замешивания частиц в расплав – прост в исполнении и доступен технологически, поскольку реализуется на стандартном литейном оборудовании, однако его использование зачастую затруднено низкой смачиваемостью высокодисперсных частиц и их склонностью к агломерированию, а кроме того, и высокой стоимостью керамических нанопорошков. В этой связи перспективным является применение метода самораспространяющегося синтеза (СВС), который позволяет формировать керамическую дисперсную фазу в результате экзотермического взаимодействия исходных компонентов сразу в расплаве, т.е. in-situ. Наиболее

подходящим для реализации СВС в расплаве алюминия является тугоплавкое соединение карбида титана, реакция образования которого из элементарных порошков титана и углерода отличается значительным выделением тепла, а близость размерных параметров кристаллической решетки ГЦК у TiC и  $\alpha$ -Al позволяет его частицам хорошо смачиваться расплавом и служить эффективными центрами кристаллизации. При этом собственные высокие показатели твердости, модуля упругости и температуры плавления карбида титана способны обеспечить повышение механических характеристик синтезируемых композитов.

В РФ есть ряд примеров получения in-situ фазы карбида титана в расплаве алюминия и, например, в работе [6] установлена возможность синтеза данной фазы с размерами до 1 мкм из порошков титана и нанопорошка графита в расплаве алюминия технического А6 при температуре 750 °С в общем количестве до 0,3 масс.%, что позволяет повысить прочность с 69 до 83 МПа. А в исследовании [7] показана возможность получения многофазных композитов систем Al-Ti-SiC-B<sub>4</sub>C и Al-Ti-SiC-B путем введения частиц SiC, B<sub>4</sub>C микронных размеров и попутного синтеза фаз TiC, TiB<sub>2</sub>, TiB, AlB<sub>2</sub>, TiAl (о размерах не сообщается) при температуре расплава алюминия 825 °С с использованием комплексного флюса, включающего 9,4%KCl, 6%NaCl, 4,6%Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> и 80%(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO). Предполагается, что экзотермические реакции образования сопутствующих армирующих фаз, в т.ч. TiC, повышают температуру расплава и тем самым создают условия для лучшего усвоения карбидов кремния и бора, что позволяет в значительной степени улучшить износ- и задиростойкость получаемых материалов.

Анализ зарубежных публикаций также показал наличие успешных разработок, позволяющих, например, из смеси порошков титана и графита получать методом СВС в расплаве алюминия 6–12 об. %TiC с размером частиц до 1 мкм [8]. В работе [9] изготавливают композиты путем ввода шихты из лигатурного сплава Al-10%Ti и активированного угля в расплав алюминия при 1250 °С с последующей выдержкой в течение 30 минут. Результатом является получение равномерно распределенных частиц TiC с размером 0,5 мкм в количестве 3, 5 и 10 масс.% и фазы Al<sub>3</sub>Ti, что приводит к увеличению твердости и прочности до 32,9, 37, 41 HV и 123, 142, 189 МПа при некотором снижении относительного удлинения до 16, 12 и 5% соответственно. Приведенные технологии позволяют синтезировать карбидную фазу высокой дисперсности в составе исходной алюминиевой основы. Но и в присутствии легирующих элементов возможно формирование высокодисперсной фазы карбида титана, которая оказывает свое положи-

тельное влияние и, например, в исследовании [10] отмечается, что присутствие 0,1–1,0 масс.% наноразмерных частиц TiC в матрице алюминий–медь способствует кратному измельчению зерна и существенному повышению дисперсности  $\theta$ -фазы (Al<sub>2</sub>Cu). Наиболее убедительно преимущество армирования именно наноразмерной карбидной фазой показано в исследовании [11], где проведено сравнение свойств композитов, полученных на основе Al-5%Cu путем механического замешивания 0,1–1,0 масс.% наноразмерных частиц TiC<sub>p</sub> и 1,0–5,0 масс.% микроразмерных TiC<sub>p</sub> с последующей термической обработкой T6 (выдержка под закалку 12 ч. при 538 °C и старение 10 ч. при 165 °C). Максимальные показатели по износостойкости при 180 °C имел образец, содержащий 0,5 масс.% наночастиц TiC, что оказалось на 83,5 % выше, чем у матричного сплава Al–Cu и на 16,5 % выше, чем у образца с 5 масс.% микроразмерных частиц TiC.

Приведенный обзор публикаций доказывает перспективность работ в этом направлении, но, как видно, большинство исследователей ограничивают количество введенной фазы 1 %, а в немногочисленных работах, где композиты содержат большее количество армирующей фазы, их свойства полноценно не исследованы. Однако в Самарском государственном техническом университете разработана и успешно применяется собственная методика СВС 10 масс.%TiC нано- и субмикронных размеров в расплавах технического алюминия, модельных сплавов Al-5%Cu, Al-5%Cu-2%Mn, Al-5%Cu-4%Ni и промышленных сплавов AMg2, AMg6, AK10M2H, что позволяет существенно повысить их показатели твердости, микротвердости, прочности на сжатие и износостойкости [12, 13]. Полученные результаты могут быть эффективно применены для армирования и других алюминиевых сплавов, к которым предъявляются особые требования по твердости и износостойкости. К числу таких относится литейный сплав AM4,5Кд (ВАЛ10), который по прочности превосходит пространственный сплав AM5 и применяется для изготовления тяжело нагруженных узлов, работающих при температурах до 300 °C преимущественно в аэрокосмическом комплексе [14]. В связи с этим, целью данной работы было поставлено получение методом СВС композиционного материала AM4,5Кд-10%TiC, проведение термической обработки и изучение комплекса его свойств.

### МЕТОДЫ

В ходе исследований в качестве матричной основы использовался литейный сплав AM4,5Кд, выплавленный по ГОСТ 1583-93, нагрев которого осуществлялся до температуры 900 °C в плавильной печи ПП20/12. Для синтеза армирующей фазы в расплав вводились в алюминиевой фольге порошки титана ТПП-7 (ТУ 1715-449-05785388) и технического углерода П-701 (ГОСТ 7885-86), взятые в стехиометрическом соотношении, с добавкой в качестве флюса порошка соли Na<sub>2</sub>TiF<sub>6</sub> (CAS 17116-13-1) в количестве 5 % от массы шихты. Микроскопический анализ образцов проводился с применением растрового электронного микроскопа Jeol JSM-6390A, рентгенофазовый анализ – по-

средством автоматизированного дифрактометра ARL X'tra (Thermo Scientific). Количественная обработка рентгенограмм осуществлялась с помощью программы High Score Plus. Термическая обработка проводилась на цилиндрических образцах с размерами 20x20 мм в лабораторной печи сопротивления Накал ПЛ5/12,5.

Определение плотности образца проводилось путем гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018-74, исследование электропроводности – по ГОСТ 27333-87. Коэффициент термического линейного расширения определялся на механическом dilatометре путем измерения удлинения цилиндрических стержней в течение 5 часов с шагом 25 °C до 300 °C. Коррозионная стойкость исследовалась по ГОСТ 58346-2019 при условиях: водный раствор 5 % NaCl; газовая фаза 1 МПа CO<sub>2</sub>, 0,5 МПа H<sub>2</sub>S, 3,5 МПа N<sub>2</sub>; температура 80 °C; время выдержки 240 часов; общее давление 5 МПа. Расчет показателей коррозионной стойкости осуществлялся по ГОСТ 9.908-85.

Твердость образцов определялась методом Бринелля по ГОСТ 9012-59, микротвердость – по ГОСТ 9450-76. Испытания на одноосное сжатие осуществлялись на машине Instron 5988 по ГОСТ 25.503-97 на образцах III типа с диаметром 20 мм, высотой 40 мм. Трибологические испытания выполнялись на триботехническом комплексе «Универсал-1Б» по схеме трения скольжения: «кольцо (контртело) – плоскость (образец)». Материал контртела – сталь 40X (закалка, отпуск, HB = 420 кгс/мм<sup>2</sup>). Средний диаметр кольцевой поверхности трения 5 мм. Частота вращения шпинделя – 600 мин<sup>-1</sup>.

### РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспериментального синтеза композиционного материала AM4,5Кд-10%TiC наблюдалась активная реакция СВС со значительным искро- и газообразованием, а анализ микроструктуры образца показал формирование множества дисперсных частиц карбида титана с размерами от 100 нм (рисунок 1, а–в). Проведенная далее серия экспериментов с варьированием температурно-временными параметрами термической обработки позволила установить, что максимальную твердость композита 142 НВ можно достичь в результате проведения закалки с температуры 545 °C и старения при 170 °C в течение 4 ч., сохранив при этом уровень дисперсности карбидной фазы (рисунок 1, г–е). Результаты рентгенофазового анализа композита AM4,5Кд-10%TiC до и после термической обработки свидетельствуют о присутствии в составе композита не менее, чем 9 % фазы карбида титана (полученные значения в используемой программе High Score Plus округляются до целых единиц, поэтому реальное содержание возможно до 9,5 масс.% TiC), причем ее наличие не препятствует выделению из твердого раствора 2 масс.% упрочняющей  $\theta$ -фазы (Al<sub>2</sub>Cu) в ходе проведенного старения (рисунок 2).

Исследование комплекса характеристик для сравнения проводилось на образцах матричного сплава AM4,5Кд (с аналогичным режимом термической обработки) и синтезированного композиционного материала, результаты приведены в таблицах 1–3.

## РАЗРАБОТКА ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АМ4, 5Кд-10%ТiС С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

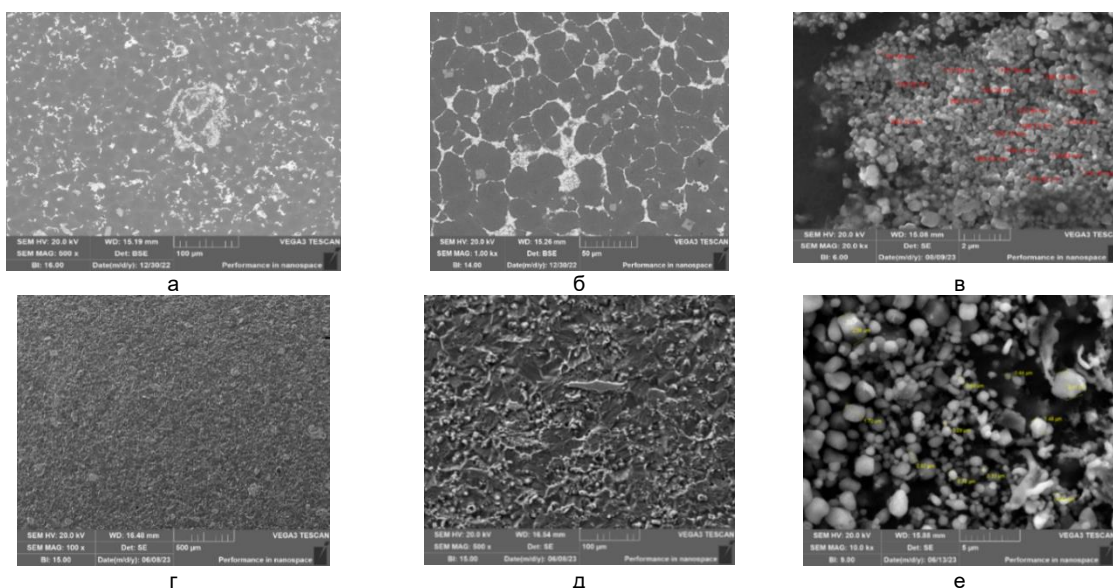


Рисунок 1 – Микроструктура образца АМ4,5Кд-10%ТiС до (а, б, в) и после (г, д, е) термической обработки

Figure 1 – Microstructure of the sample AM4.5Kd-10%TiC before and after heat treatment

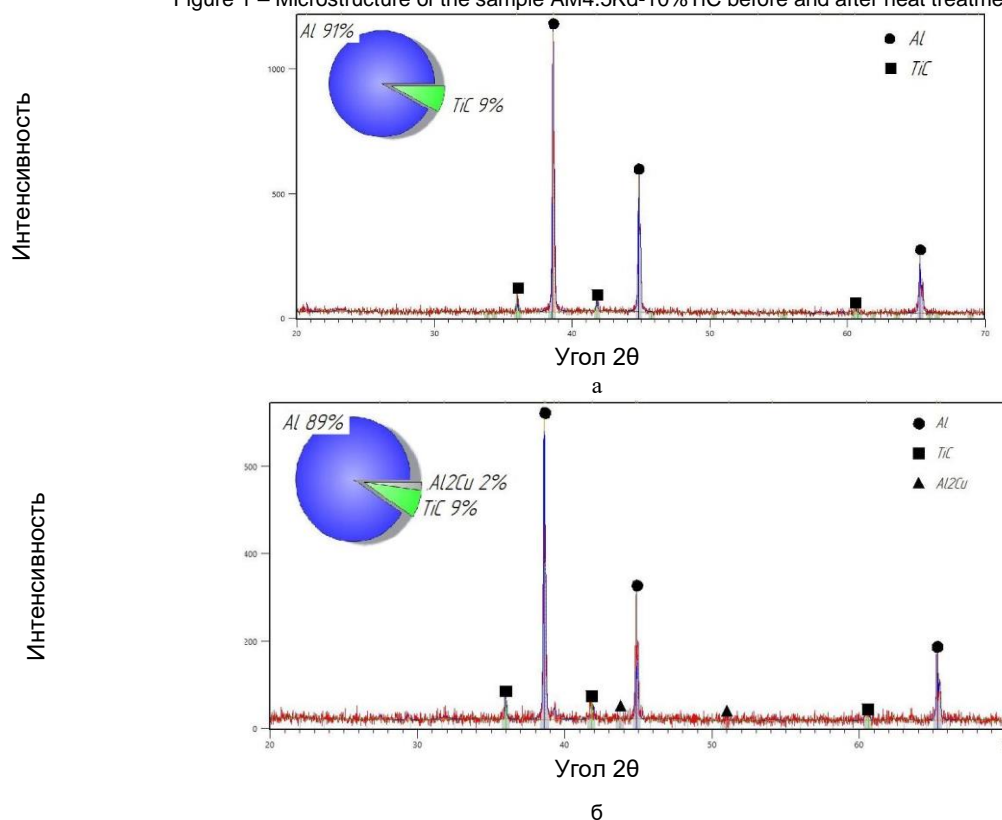


Рисунок 2 – Рентгенофазовый анализ образца АМ4,5Кд-10%ТiС до (а) и после (б) термической обработки

Figure 2 – X-ray phase analysis of the AM4.5Kd-10%TiC sample before and after heat treatment

Таблица 1 – Физические и химические свойства / Table 1 – Physical and chemical properties

Образец	Плотность, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Электропроводность, G, МСМ/м	КТЛР*, $\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> К <sup>-1</sup>	Скорость коррозии, V, г/(м <sup>2</sup> ·ч)	Глубинный показатель коррозии, т, мм/год
АМ4,5Кд, без т/о	2,80	15,0	30,8	0,259	0,0008
АМ4,5Кд, после т/о	2,80	15,0	29,3	0,399	0,0012
АМ4,5Кд-10%ТiС, без т/о	2,93	13,5	33,4	0,319	0,0009
АМ4,5Кд-10%ТiС, после т/о	2,93	13,6	30,8	0,675	0,0019

\* при температуре 300 °С

Таблица 2 – Механические свойства / Table 2 – Mechanical properties

Образец	Твердость, НВ 10 <sup>-1</sup>	Микротвердость, НВ, МПа	Прочность на сжатие	
			$\sigma_s$ , МПа	$\epsilon$ , %
AM4,5Кд, без т/о	61,3	604	324	65
AM4,5Кд, после т/о	135,9	1323	532	40
AM4,5Кд-10%TiC, без т/о	76,1	1008	355	62
AM4,5Кд-10%TiC, после т/о	142,0	1393	568	32

Таблица 3 – Трибологические свойства [15] / Table 3 – Tribological properties

Образец	Скорость изнашивания*, мкм/час	Коэффициент трения*	Температура самонагрева, °С	Максимально допустимая нагрузка, Н**
AM4,5Кд, без т/о	11,5	0,12	70	-
AM4,5Кд, после т/о	3	0,08	65	700
AM4,5Кд-10%TiC, без т/о	5,25	0,08	67	-
AM4,5Кд-10%TiC, после т/о	1,25	0,03	65	1200

\* при нагрузке 400 Н

\*\* нагружение до достижения схватывания (задир)

### ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ физических и химических свойств образцов матричного сплава и композиционного материала показал, что показатели плотности и электропроводности в обоих случаях не претерпевают изменений в результате термообработки (таблица 1) и наблюдается некоторое снижение коэффициента линейного термического расширения, что объясняется повышением уровня адгезионной связи на границах раздела фаз. Однако в присутствии частиц карбидной фазы незначительно снижаются показатели коррозионной стойкости, хотя значения все же остаются на уровне, позволяющем отнести полученный композит к группе весьма стойких к коррозии материалов [16].

Данные результаты механических характеристик свидетельствуют о существенно возросших значениях твердости, микротвердости и прочности на сжатие при сохранении достаточной пластичности (таблица 2), что обусловлено высокой дисперсностью и удельной прочностью самих керамических частиц, выделением интерметаллической  $\theta$ -фазы и повышенной плотностью дислокаций после термообработки [17, 18]. Кроме того, так же, как присутствие кадмия, приводит к микроискажениям матричной решетки и интенсификации распада твердого раствора с образованием более плотных зон ГП, аналогично и наличие множества высокодисперсных керамических частиц, безусловно, приносит дополнительные напряжения, ускоряющих процесс распада твердого раствора.

Наиболее значительным оказалось влияние частиц карбидной фазы на трибологические характеристики (таблица 3) и при постоянно действующей нагрузке 400 Н их присутствие позволяет достигать не менее чем трехкратного снижения скорости износа и коэффициента трения при сохранении уровня температуры самонагрева, а максимальная нагрузка схватывания до появления задир повышается с 700 до 1200 Н.

### ВЫВОДЫ

Полученный методом СВС в расплаве композиционный материал AM4,5Кд-10%TiC характеризуется повышенным комплексом механических и

трибологических характеристик с достаточным уровнем термического расширения и коррозионной стойкости, что позволяет рекомендовать его для изготовления узлов трибосопряжений, эксплуатирующихся при повышенных нагрузках и температурах в различных средах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование механических свойств перспективных алюмоматричных композиционных материалов, армированных SiC и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Ю.А. Курганова [и др.] // Материаловедение. 2021. № 6. С. 34–38. doi.org/10.31044/1684-579X-2021-0-6-34-38.
2. Kar A., Sharma A., Kumar S.A. Critical Review on Recent Advancements in Aluminium-Based Metal Matrix Composites // Crystals. 2024. № 14(412). P. 1–42. doi: 10.3390/cryst14050412.
3. Sanaty-Zadeh A. Comparison between current models for the strength of particulate-reinforced metal matrix nanocomposites with emphasis on consideration of Hall-Petch effect // Materials Science and Engineering A. 2012. № 531(1). P. 112–118. doi: 10.1016/J.MSEA.2011.10.043.
4. Zhang Z., Chen D.L. Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites // Materials Science and Engineering A. 2008. № 483(15). P. 148–152. doi: 10.1016/j.msea.2006.10.184.
5. Михеев Р.С., Чернышова Т.А. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники. М.: Издание РФФИ, 2013. 353 с.
6. Терентьев Н.А. Исследование и разработка литейных технологий при получении дисперсно-упрочненных алюминиевых сплавов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2017. 19 с.
7. Панфилов А.А. Разработка алюмоматричных композиционных сплавов и усовершенствование жидкофазной технологии их получения для отливок с повышенными триботехническими свойствами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2011. 22 с.
8. Cho Y.H., Lee J.M., Kim S.H. Composites Fabricated by a Thermally Activated Reaction Process in an Al Melt Using Al-Ti-C-CuO Powder Mixtures. Part I: Microstructural Evolution and Reaction Mechanism // Metallurgical and Materials Transactions. 2014. № 45. P. 5667–5678. doi: 10.1007/s11661-014-2476-x.
9. Rai R.N., Saha S.C., Chakraborty M. Studies on synthesis of in-situ Al-TiC metal matrix composites // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. № 117. P. 012042. doi: 10.1088/1757-899X/117/1/012042.
10. Zhou D., Qiu F., Jiang Q. The nano-sized TiC par-

## РАЗРАБОТКА ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА АМ4, 5Кд-10%TiC С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

ticle reinforced Al-Cu matrix composite with superior tensile ductility // *Materials Science and Engineering A*. 2015. № 622. P. 189–193. doi: 10.1016/j.msea.2014.11.006.

11. The Dry Sliding Wear Properties of Nano-Sized TiCp/Al-Cu Composites at Elevated Temperatures / W.S. Tian [et al] // *Materials*. 2017. № 10(8). P. 939. doi: 10.3390/ma10080939.

12. Жидкофазное получение методом СВС и термическая обработка композитов на основе алюминиево-магниевого сплава, упрочненных высокодисперсной фазой карбида титана / А.Р. Луц [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*, 2023. Т. 29. № 4. С. 70–86. doi: 10.17073/0021-3438-2023-4-70-86.

13. Выбор термической обработки и исследование ее влияния на структуру и свойства композиционного материала АК10М2Н-10%TiC, полученного методом СВС в расплаве / А.Р. Луц [и др.] // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*, 2024. Т. 30. № 2. С. 30–43. doi: 10.17073/0021-3438-2024-2-30-43.

14. Шеметев Г.Ф. Алюминиевые сплавы: составы, свойства, применение : учеб. пособие. Часть 1. Санкт-Петербург : Изд-во СПбГПУ, 2012. 155 с.

15. 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. С. 59–69. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-59-69.

16. Перельгин Ю.П., Лось И.С., Киреев С.Ю. Коррозия и защита металлов от коррозии : учеб. пособие. Пенза : Изд-во ПГУ, 2015. 81 с.

17. Аксенов А.А. Оптимизация состава и структуры композиционных материалов на алюминиевой и медной основах, получаемых жидкофазными методами и механическим легированием : автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2007. 51 с.

18. Особенности термической обработки композиционных материалов с алюминиевой матрицей (обзор) / Е.И. Курбаткина [и др.] // *Труды ВИАМ*. 2017. № 11. С. 82–97. doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-9-9.

### Информация об авторах

А. Р. Луц – кандидат технических наук, доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы» Самарского государственного технического университета.

### REFERENCES

1. Kurganova, Yu.A., Kolmakov, A.G., Yijin, Chen & Kurganov, S.V. (2021). Study of the mechanical properties of promising aluminum matrix composite materials reinforced with SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Materialovedeniye*, (6), 34-38. (In Russ.). doi: 10.31044/1684-579X-2021-0-6-34-38.

2. Kar, A., Sharma, A. & Kumar, S.A. (2024). Critical Review on Recent Advancements in Aluminium-Based Metal Matrix Composites. *Crystals*, 14(412), 1-42. doi: 10.3390/cryst14050412.

3. Sanaty-Zadeh, A. (2012). Comparison between current models for the strength of particulate-reinforced metal matrix nanocomposites with emphasis on consideration of Hall-Petch effect. *Materials Science and Engineering A*, (531(1)), 112-118. doi: 10.1016/J.MSEA.2011.10.043.

4. Zhang, Z. & Chen, D.L. (2008). Contribution of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites. *Materials Science and Engineering A*, (483(15)), 148-152. doi: 10.1016/j.msea.2006.10.184.

5. Mikheyev, R.S. & Chernyshova, T.A. (2013). *Alumi-*

*num-matrix composite materials with carbide hardening for solving problems of new technology*, Moscow: RFFI. (In Russ.).

6. Terentyev, N.A. (2017). Research and development of casting technologies for the production of dispersed-hardened aluminum alloys. Extended abstract of candidate's thesis. Krasnoyarsk. (In Russ.).

7. Panfilov, A.A. (2011). Development of aluminum-matrix composite alloys and improvement of liquid-phase technology for their production for castings with enhanced tribotechnical properties. Extended abstract of candidate's thesis. Vladimir. (In Russ.).

8. Cho, Y.H., Lee, J.M. & Kim, S.H. (2014). Composites Fabricated by a Thermally Activated Reaction Process in an Al Melt Using Al-Ti-C-CuO Powder Mixtures. Part I: Microstructural Evolution and Reaction Mechanism. *Metallurgical and Materials Transactions*, (45), 5667-5678. doi: 10.1007/s11661-014-2476-x.

9. Rai, R.N., Saha, S.C. & Chakraborty, M. Studies on synthesis of in-situ Al-TiC metal matrix composites. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. doi: 10.1088/1757-899X/117/1/012042.

10. Zhou, D., Qiu, F. & Jiang, Q. (2015). The nano-sized TiC particle reinforced Al-Cu matrix composite with superior tensile ductility. *Materials Science and Engineering A*, (622), 189-193. doi: 10.1016/j.msea.2014.11.006.

11. Tian, W.S., Zhao, Q.-L., Zhao, C.J., Qiu, F. & Jiang, Q.C. (2017). The Dry Sliding Wear Properties of Nano-Sized TiCp/Al-Cu Composites at Elevated Temperatures. *Materials*, (10(8)), 939. doi: 10.3390/ma10080939.

12. Luts, A.R., Sherina, Yu.V., Amosov, A.P. & Kachura, A.D. (2023). Liquid-phase preparation by the SHS method and heat treatment of composites based on aluminum-magnesium alloys reinforced with a highly dispersed phase of titanium carbide. *News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy*, (29(4)), 70-86. (In Russ.). doi: 10.17073/0021-3438-2023-4-70-86.

13. Luts, A.R., Sherina, Yu.V., Amosov, A.P., Minakov, E.A. & Ibatullin, I.D. (2024). The choice of heat treatment and the study of its effect on the structure and properties of the composite material AK10M2H-10%TiC obtained by the SHS method in the melt. *News of higher educational institutions. Non-ferrous metallurgy*, (30(2)), 30-43. (In Russ.). doi: 10.17073/0021-3438-2024-2-30-43.

14. Shemetev, G.F. (2012). *Aluminum alloys: compositions, properties, application: A textbook. Part 1*. St. Petersburg: Publishing House of SPbGPU. (In Russ.).

15. Sherina, Yu.V. (2024). Investigation of the effect of the addition of a highly dispersed phase of titanium carbide synthesized in a melt and heat treatment on the structure and properties of the AM4,5Kd alloy. *Transport engineering*, (3), 59-69. (In Russ.). doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-59-69.

16. Perelygin, Yu.P., Los, I.S. & Kireev, S.Yu. (2015). *Corrosion and protection of metals from corrosion: A textbook*. Penza: Publishing House of PGU. (In Russ.).

17. Aksenov, A.A. (2007). Optimization of the composition and structure of composite materials based on aluminum and copper bases obtained by liquid-phase methods and mechanical alloying. Extended abstract of Doctor's thesis. Moscow. (In Russ.).

18. Kurbatkina, E.I., Shavnev, A.A., Kosolapov, D.V. & Gololobov, A.V. (2017). Features of heat treatment of composite materials with aluminum matrix (overview). *Works of VIAM*, (11), 82-97. (In Russ.). doi: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-9-9.

### Information about the authors

A.R. Luts - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of «Metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials» of the Samara State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.