

**Материаловедение
и технологии материалов
Materials science and materials technology**

Научная статья
Статья в открытом доступе
УДК 539.92
doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-59-69

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ
ФАЗЫ КАРБИДА ТИТАНА, СИНТЕЗИРОВАННОЙ
В РАСПЛАВЕ, И ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ
И СВОЙСТВА СПЛАВА АМ4,5Кд**

Юлия Владимировна Шерина✉

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия
yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5451-7107>

Аннотация

Приводятся результаты исследования, посвященного изучению влияния армирования высокодисперсной фазой карбида титана в количестве 10 масс.% на физико-механические и триботехнические свойства промышленного алюминиевого сплава марки АМ4,5Кд. Проведен анализ физико-механических (плотность, пористость, коэффициент термического линейного расширения, твердость, микротвердость) и триботехнических (скорость износа, коэффициент трения, температура саморазогрева) свойств композиционного материала АМ4,5Кд-10%TiC, полученного методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза до и после термической обработки. Выявлено, что образцы композита после проведения термической обработки обладают хорошим сочетанием физико-механических свойств, а именно низким

уровнем пористости, низким значением коэффициента термического линейного расширения (КТЛР), повышенными в 2 раза значениями твердости и микротвердости. Следует обратить особое внимание, что армирование керамической фазой в комплексе с термической обработкой, приводит к значительному повышению уровня износостойкости матричного сплава (в 9 раз) и уменьшению коэффициента трения (в 4 раза). Таким образом, по результатам комплекса проведенных исследований, полученный композиционный материал АМ4,5Кд-10%TiC можно рекомендовать в качестве материала, используемого в узлах трибосопряжений.

Ключевые слова: композиционный материал, алюминий, карбид титана, трибология, высокотемпературный синтез.

Ссылка для цитирования:

Шерина Ю.В. Исследование влияния добавки высокодисперсной фазы карбида титана, синтезированной в расплаве, и термообработки на структуру и свойства сплава АМ4,5Кд / Ю.В. Шерина // Транспортное машиностроение. – 2024. – №3. – С. 59-69. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-59-69.

Original article
Open Access Article

**STUDY OF THE EFFECT OF ADDING FINE PHASE OF TITANIUM
CARBIDE SYNTHESIZED IN THE MELT, AND HEAT
TREATMENT ON THE STRUCTURE
AND PROPERTIES OF AM4.5Kd ALLOY**

Yulia Vladimirovna Sherina✉

Samara State Technical University, Samara, Russia
yulya.makhonina.97@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5451-7107>

Abstract

The study results are given which are devoted to finding the effect of reinforcement with fine phase of titanium carbide in the amount of 10 masses% on the physico-mechanical and tribotechnical properties of industrial aluminum AM4.5Kd alloy. The physico-mechanical (density, porosity, coefficient of thermal linear expansion, hardness, microhardness) and tribotechnical (wear rate, friction factor, self-heating temperature) properties of the composite material AM4.5Kd-10%TiC obtained by self-propagating high-temperature synthesis before and after heat treatment are analyzed. It is found out that composite samples after heat treatment have a good combination of physical and mechanical properties, namely a low level of

porosity, a low value of the coefficient of thermal linear expansion, and the values of hardness and microhardness are increased twice. Special attention should be paid to the fact that reinforcement with a ceramic phase in combination with heat treatment leads to a significant increase in the level of wear resistance of the matrix alloy (by 9 times) and a decrease in the friction factor (by 4 times). Thus, according to the results of the studies conducted, the resulting composite material AM4.5Kd-10%TiC can be recommended as a material used in tribological assemblies.

Keywords: composite material, aluminum, titanium carbide, tribology, high-temperature synthesis.

Reference for citing:

Sherina YuV. Study of the effect of adding fine phase of titanium carbide synthesized in the melt and heat treatment on the structure and properties of AM4.5Kd alloy. *Transport Engineering*. 2024;3:59-69. doi: 10.30987/2782-5957-2024-3-59-69.

Композиты с алюминиевой матрицей (АМК) представляют собой наиболее интересную группу передовых легких материалов. В данных материалах в качестве наполнителя широко используются микро- и наноразмерные частицы Al_2O_3 , SiC, AlN, ZrO_2 , BN, TiC и др. [1-3]. Использование алюминия и его сплавов в качестве матричного материала постоянно возрастает, находя многочисленные применения во многих отраслях промышленности благодаря их низкой плотности, хорошей прочности и пластичности, отличной теплопроводности и коррозионной стойкости, а также низкой стоимости (по сравнению с другими легкими металлами, такими как Mg и Ti). Исследования показывают повышенную твердость и высокую износостойкость композитов с увеличением содержания наполнителя.

Для получения АМК используются две основных группы способов: твердофазные, отличающиеся сложностью аппаратного оформления, и более распространенные жидкофазные, реализуемые на стандартном литейном оборудовании, и включающие обычно три основных этапа: плавление матричного сплава, введение армирующих компонентов, кристаллизация расплава – например, литье с перемешиванием или литье под флюсом. Однако в последнее время большее применение находит еще одно направление жидкофазного совмещения компонентов, при котором наполнитель синтезируется из исходных компонентов непосредственно в процессе изготовления композиционного ма-

териала – такая технология получила название самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) в расплаве [4, 5]. На базе СамГТУ был получен ряд композиционных материалов на основе модельных сплавов Al-10%TiC, Al-5%Cu-10%TiC [5, 6] и на основе промышленных алюминиевых сплавов АМг2, АМг6 [7], которые обладали повышенными значениями твердости и износостойкости.

Добавление твердых частиц карбидной керамики способствует улучшению ряда эксплуатационных характеристик получаемых АМК и вызывает широкий интерес исследователей [8]. Так, в работе [9] приводится пример успешного применения АМК составов АЛ1-25 %SiC и АК12-5%SiC-5 %C в качестве втулок подшипников скольжения и показано преимущество использования пары трения «композит-сталь» перед парой «бронза-сталь». Также в результате замены материала достигается увеличение срока службы изделия на 5000 циклов работы сверх предусмотренных техническими условиями 10000 циклов, что составляет – 40 %. Компрессоры с рабочей парой, в состав которой входит композитный материал (КМ), сохраняют характеристики, заложенные технической документацией, в течение всего срока службы. В работе [10] установлено, что армирование карбидом кремния промышленного сплава АК12М2МгН приводит к повышению износостойкости в 10 раз, а также снижению коэффициента линейного термического расширения, что позволяет прогнозировать повышение термостабиль-

ности. В исследовании [11] показано, что армирование этой же основы 10 масс.% карбида титана приводит к снижению значения коэффициента трения с 1,09 до 0,82, а также понижению интенсивности изнашивания практически в 2 раза. В работе [12] показана возможность получения композиционного материала на основе Al армированного Cr_3C_2 . Интенсивность износа чистого алюминия была изначально высокой. Введение армирующих частиц уменьшает интенсивность изнашивания материала. Скорость изнашивания композитов ниже, чем наблюдаемая в основном металле, и уменьшается с увеличением массовой доли содержания Cr_3C_2 в композите, что свидетельствует о существенном влиянии увеличения скорости скольжения на скорость изнашивания. Отчетливо видно, что скорость износа уменьшается с увеличением массовой доли Cr_3C_2 и расстояния скольжения. Скорость изнашивания композита с долей армирования 10 масс.% Cr_3C_2 в 3 раза ниже, чем матричного сплава, что согласуется с данными литературы [13-15].

Анализ полученных данных показывает, что введение карбидных фаз в состав алюминия или сплавов на его основе способствует общему повышению термической стабильности, твердости и износостойкости, что определяет перспективность их применения в качестве замены твердых сплавов, изделий триботехнического назначения или т.п.

Следует отметить, что карбид титана является наиболее перспективным материалов для использования в качестве армирующей фазы, чем карбид кремния, так как имеет более высокую температуру плавления и твердость, термическую стабильность, совместимость кристаллической решетки с алюминием и хорошие трибологические характеристики [16-19], что делает их перспективным материалом для использования в качестве армирующей фазы.

Анализируя изученную литературу, очевидно, что введение армирующей фазы в состав промышленных алюминиевых сплавов с последующим проведением термической обработки является перспективным направлением. Однако большинство исследований проведено на сплавах АМг2-6, Д16, В95, АК12М2МгН, что отражено в работах [9, 20, 21]. Но особенно актуаль-

ным армирование тугоплавкой фазой карбида титана ($T_{\text{пл}} = 3260 \text{ }^\circ\text{C}$) может быть для высоко- и жаропрочных сплавов, к которым относится, например, литейный сплав АМ4,5Кд, используемый для получения точных и сложных по конфигурации отливок, работающих при температурах до 300°C . Также важно отметить, что данный сплав относится к группе термически упрочняемых сплавов, что дает возможность дополнительного упрочнения композиционного материала на его основе.

Принимая во внимание все вышесказанное, в рамках данного исследования поставлена следующая цель: изучить влияние армирования высокодисперсной фазой карбида титана в количестве 10 масс.%, полученной методом СВС в расплаве, и последующей термической обработки на физико-механические и триботехнические свойства матричного сплава АМ4,5Кд.

Для проведения исследований использовался промышленный сплав АМ4,5Кд (ОСТ 1 90377-87), порошок титана ТПП-7 (ТУ1715-449-05785388), порошок углерода П-701 (ГОСТ 7585-86), а также в качестве флюса Na_2TiF_6 (ТУ 6-09-01-425-77). Композиционный материал получали по схеме, приведенной в работе [22]. Термическая обработка производилась по режиму Т6 (нагрев под закалку до $T=545 \text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой 1 час и охлаждением в холодную воду с последующим проведением искусственного старения при $T=170 \text{ }^\circ\text{C}$ с выдержкой 4 часа для композиционного материала и 6 часов – для матричной основы) в камерной электропечи сопротивления марки Накал ПЛ5/12,5 (свыше $300 \text{ }^\circ\text{C}$) и в универсальном сушильном шкафу марки SNOL 67/370 (до $300 \text{ }^\circ\text{C}$) [23].

Определение количества и степени равномерности распределения армирующей фазы в объеме матрицы производили с использованием комплекса компьютерных программ «Micro-S Polar» и «ImageJ». Фазовый состав анализировался методом рентгенофазового анализа (РФА). Съемка рентгеновских спектров – на автоматизированном дифрактометре марки ARL X'tra (Thermo Scientific) с использованием Си-излучения при непрерывном сканировании в интервале углов 2θ от 20 до 80 град со скоростью 2 град/мин. Количественный

анализ дифрактограмм проводился с использованием программы «HighScore Plus». Экспериментальное определение плотности образцов проводилось путем гидростатического взвешивания по ГОСТ 20018-74. Твердость исследовалась на твердомере ТШ-2М (ГОСТ 9012-59). Микротвердость образцов определялась на стандартном микротвердомере Виккерса ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76). Для определения коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) использовался метод, основанный на измерении удлинения цилиндрических стержней длиной 60 мм и диаметром 7 мм при нагревании. Измерение КТЛР осуществлялось на механическом dilatометре, включающем в себя: индикатор, трансформатор, мультиметр, электропечь сопротивления, кварцевую трубку, термopару. Условия испытаний: длительность – 5 часов; термopара ТХА тип К; предел температур – 300 °С; шаг температуры – 25 °С. Оценку триботехнических свойств образцов выполняли на универсальном триботехническом комплексе «Универсал-1Б» при реализации трения скольжения по схеме: «кольцо (контртелo)-плоскость (образец)». Материал контртелo – сталь 40Х (закалка, отпуск, НВ = 420 кгс/мм²). Средний диаметр кольцевой поверхности трения 5 мм. Частота вращения шпинделя – 600 мин⁻¹. Площадь поверхности трения 15 мм². В качестве смазочной среды использовали трансмиссионное масло с группой эксплуатационных свойств GL-5, имеющее в составе вы-

сокачественные антизадирные присадки. Масло наносили на обезжиренную поверхность образца (масса – 0,2 г).

Улучшение таких свойств как твердость и износостойкость в композитах Al-TiC в значительной степени зависит от количества армирующей фазы и степени равномерности распределения ее распределения [24-26], поэтому в первую очередь были оценены именно эти показатели (рис. 1). Анализ полученных данных позволяет сделать выводы о присутствии керамической фазы в количестве 10 % (рис. 1а), что соответствует введенному количеству шихты и свидетельствует о полноценно прошедшем СВС в расплаве. Степень равномерности распределения (СРР) карбидной фазы составила 0,1 (рис. 1б), что по данным работы [27] является близким к идеальной равномерности.

Проведение РФА подтверждает наличие керамической фазы в расплаве промышленного алюминиевого сплава АМ4,5Кд после СВ-синтеза (рис. 2а). Также по результатам РФА выявлено, что после проведения термической обработки и на композиционном материале (рис. 2б) и на матричной основе (рис. 2в) наблюдается выделение упрочняющей интерметаллидной θ -фазы состава Al_2Cu , что согласуется с данными работы [28]. Следует отметить, что по данным работы [28] также возможно присутствие небольшого количества фазы $Al_{20}Cu_2Mn_3$, однако ее количество слишком мало, поэтому на дифрактограмме не фиксируется.

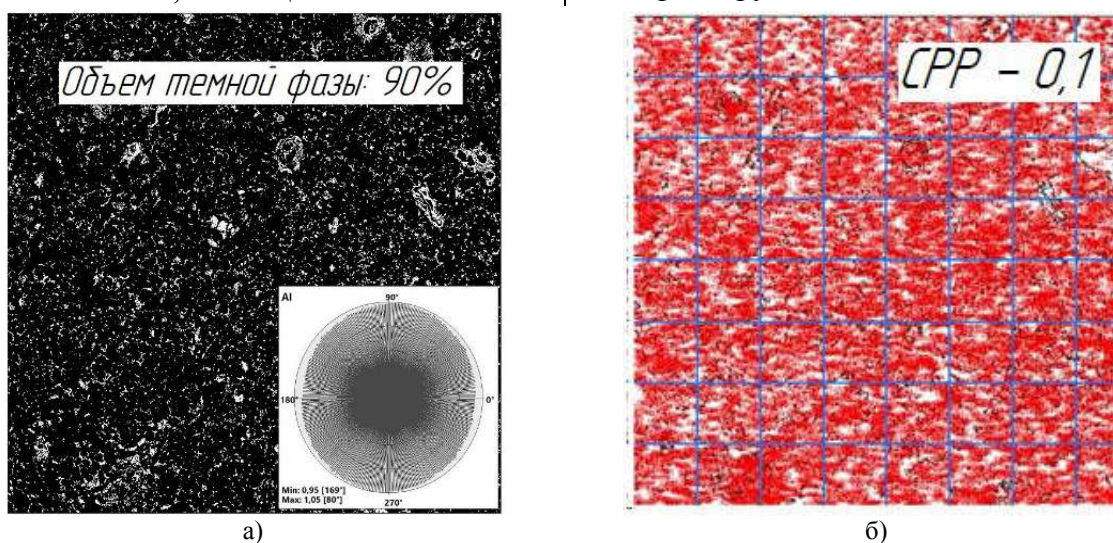


Рис. 1. Количество а – и степень равномерности распределения; б – армирующей фазы TiC в объеме матричного сплава АМ4,5Кд

Fig. 1. Quantity (a) and degree of uniformity of distribution (b) of reinforcing phase TiC in the volume of matrix alloy AM4,5Kd

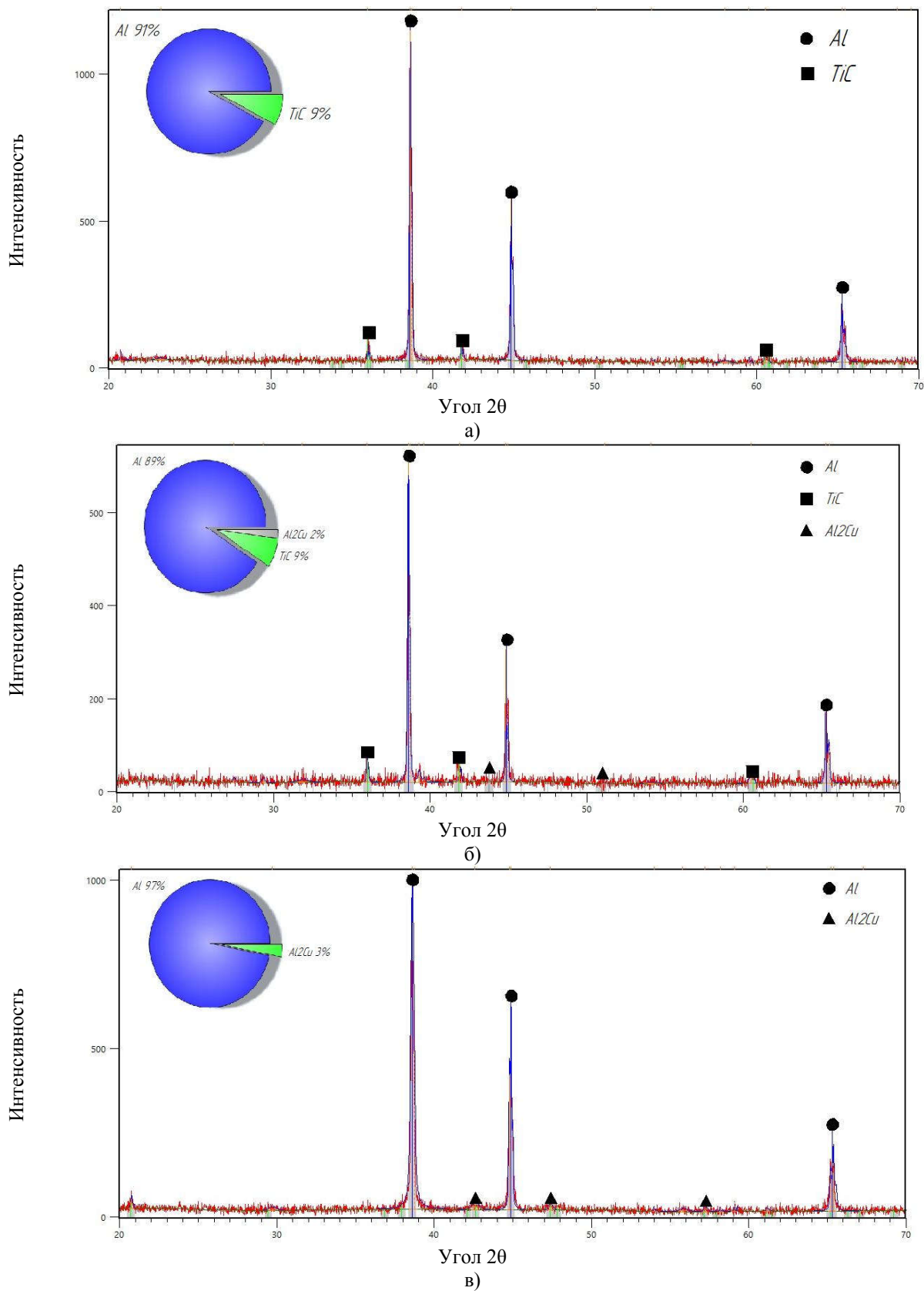


Рис. 2. Рентгенофазовый анализ: а – КМ AM4,5Kd-10 %TiC, без TO; б – КМ AM4,5Kd-10 %TiC, после TO; в – сплав AM4,5Kd, после TO
 Fig. 2. X-ray phase analysis: a) KM AM4,5Kd-10 %TiC, without TO; b) KM AM4,5Kd-10 %TiC, after TO; c) alloy AM4,5Kd, after TO

АМК, полученные методом СВС, зачастую обладают повышенными значениями пористости [29, 30], что может оказать негативное влияние на механические свойства готового продукта, поэтому в данной

работе были исследованы физико-механические характеристики композиционного материала АМ4,5КД-10 %TiC, полученного методом СВС (табл. 1).

Таблица 1

Физико-механические свойства исследуемых материалов

Table 1

Physico-mechanical properties of the materials under study

Образец	Плотность, ρ , г/см ³	Пористость, %	КТЛР*, α , 10 ⁻⁶ K ⁻¹	Твердость, НВ 10 ⁻¹	Микротвердость, НВ, МПа
АМ4,5Кд, без ТО	2,80	0,1	30,8	61,3	604
АМ4,5Кд, закалка 545 °С 1 ч. + старение 170°С 6 ч.	2,80	0,1	29,3	135,9	1323
АМ4,5Кд-10 %TiC, без ТО	2,93	1	33,4	76,1	1008
АМ4,5Кд-10 %TiC, закалка 545°С 1 ч. + старение 170 °С 4 ч.	2,93	0,1	30,8	142,0	1393

* при температуре 300°С

Анализируя полученные данные можно сказать, что армирование и термическая обработка приводят к сохранению низкого уровня пористости, низкого значения коэффициента термического линейного расширения (КТЛР), при значительном повышении значений твердости (на 80,7 НВ) и микротвердости (на 789 МПа) по сравнению с матричным сплавом в литом состоянии, а также в термообработан-

ном состоянии (6,1 НВ и 70 МПа, соответственно).

Поскольку повышение твердости, как правило, оказывает благоприятное влияние на показатели износостойкости [31], результаты испытаний триботехнических характеристик композиционного материала АМ4,5Кд-10 %TiC и его матричной основы до и после термической обработки приведены в табл. 2 и на рис. 3, 4.

Таблица 2

Триботехнические характеристики исследуемых материалов

Table 2

Tribotechnical characteristics of the materials under study

Образец	Скорость изнашивания*, мкм/час	Коэффициент трения*	Температура саморазогрева, °С	Максимально допустимая нагрузка, Н**
АМ4,5Кд, без ТО	11,5	0,12	70	-
АМ4,5Кд, закалка 545 □ 1 ч. + старение 170 □ 6 ч.	3	0,08	65	700
АМ4,5Кд-10 %TiC, без ТО	5,25	0,08	67	-
АМ4,5Кд-10 %TiC, закалка 545 □ 1 ч. + старение 170 □ 4 ч.	1,25	0,03	65	1200

* при нагрузке 400 Н

** нагружение до достижения изнашивания при схватывании

Образец АМ4,5Кд показывает низкие триботехнические свойства: наблюдается присутствие задиров на эпюре (рис. 3а),

которые являются следствием недопустимого вида изнашивания – изнашивания при схватывании. На поверхности после

испытания (рис. 4а) хорошо видно путь трения, а также наличие задиров. Проведение термической обработки на образце АМ4,5Кд позволяет значительно снизить скорость износа, эпюра характеризуется отсутствием задиров (рис. 3б), что подтверждается и внешним видом поверхности износа после испытания (рис. 4б). Композиционный материал АМ4,5Кд-10%TiC без термической обработки показал значительно лучшие триботехнические характеристики, чем образец АМ4,5Кд, достаточные для рассматриваемого узла трения (рис. 3в), однако, следует отметить,

что на поверхности после испытания (рис. 4в) хорошо прослеживается путь трения, но в отличии от матричного сплава отсутствуют задиры. После проведения термообработки композиционный материал АМ4,5Кд-10 %TiC показал достаточно высокие триботехнические свойства: низкий коэффициент трения, небольшая скорость изнашивания, поверхность хорошо прирабатывается (рис. 3г). Поверхность образца после испытания (рис. 4г) характеризуется отсутствием явного наличия следов от контр-тела и следов недопустимого вида изнашивания.

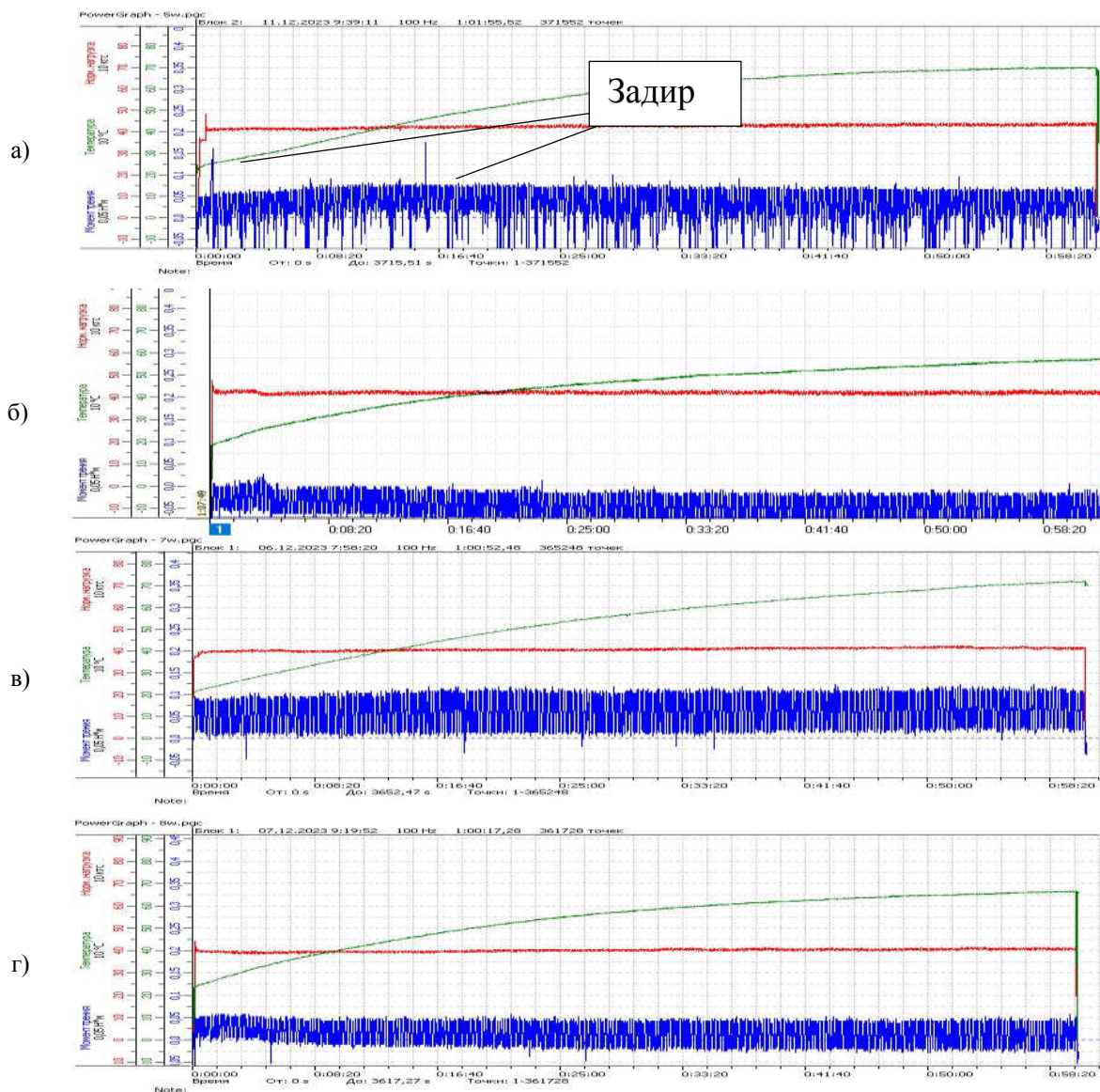


Рис. 3. Эпюры триботехнических испытаний: а – АМ4,5Кд без ТО; б – АМ4,5Кд закалка 545 °С 1 ч. + старение 170°С 6 ч.; в – АМ4,5Кд-10 %TiC без ТО; г – АМ4,5Кд-10 %TiC закалка 545 °С 1 ч. + старение 170 °С 4 ч
 Fig. 3. Epuples of tribotechnical tests: a) AM4,5Kd without treatment; b) AM4,5Kd quenching 545 °C 1 h. + aging 170 °C 6 h.; c) AM4,5Kd-10 %TiC without TO; d) AM4,5Kd-10 %TiC quenching 545°C 1 h + aging 170 °C 4 h

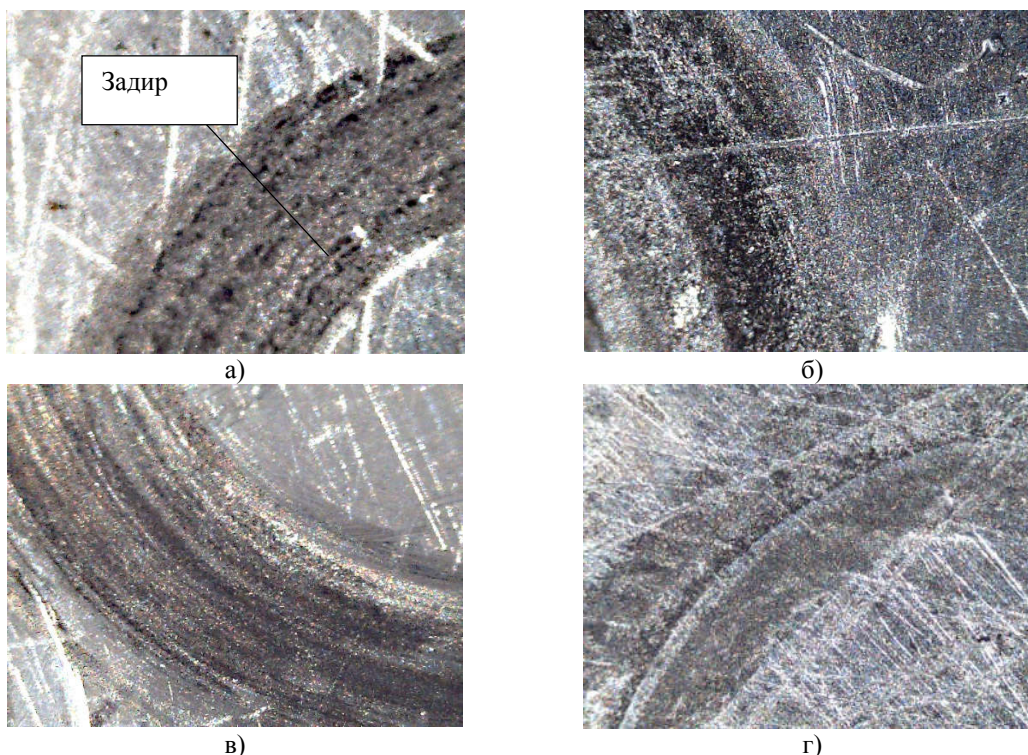


Рис. 4. Поверхность образца после определения износостойкости:
 а – AM4,5Кд без ТО; б – AM4,5Кд закалка 545 °С 1 ч. + старение 170 °С 6 ч.; в – AM4,5Кд-10 %TiC без ТО; г – AM4,5Кд-10 %TiC закалка 545 °С 1 ч. + старение 170 °С 4 ч

Fig. 4. Surface of the sample after wear resistance determination:
 a) AM4,5Kd without TO; b) AM4,5Kd quenching 545 °C 1 h + aging 170 °C 6 h; c) AM4,5Kd-10 %TiC without TO; d) AM4,5Kd-10 %TiC quenching 545 °C 1 h + aging 170 °C 4 h

Таким образом, получен новый композиционный материал, обладающий после термической обработки повышенными значениями твердости, микротвердости, износо- и задиростойкости при сохранении

низкого уровня пористости и значения КТЛР, что позволяет рекомендовать его к использованию в изделиях триботехнического назначения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kim D. Y., Choi H.J. «Recent Developments towards Commercialization of Metal Matrix Composites». *Materials (Basel)*. 2020;13(12):2820-2828. DOI: 10.3390/ma13122828.
2. Lovshenco F. G., Lozikov I. A., Khabibutin A. I. «High-temperature aluminum composite materials with special physical and mechanical properties produced by mechanical alloying». *Foundry production and metallurgy*. 2020;3; 99–111. DOI: 10.21122/16X3-6065-2020-3-99-111.
3. Alam M. A., Ya H. H., Azeem M., Yusuf M., Soomro I. A., Masood F., Shozib I.A., Sapuan S. M., Akhter J. «Artificial Neural Network Modeling to Predict the Effect of Milling Time and TiC Content on the Crystallite Size and Lattice Strain of Al7075-TiC Composites Fabricated by Powder Metallurgy». *Crystals*. 2022;12:372–392. DOI: 10.3390/cryst12030372.
4. Shi Q., Mertens R., Dadbakhsh S., Li G., Yang S. «In-situ formation of particle reinforced Aluminum matrix composites by laser powder bed fusion of Fe₂O₃/AlSi₁₂ powder mixture using laser melting/remelting strategy». *Journal of Materials Processing Technology*. 2022;299:117357. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117357.
5. Амосов А.П., Луц А.Р., Латухин Е.И., Ермошкин А.А. Применение процессов СВС для получения in situ алюмоматричных композиционных материалов, дискретно армированных наноразмерными частицами карбида титана (обзор). *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2016. №1. С.39-49. DOI: 10.17073/0021-2016-1-39-49.
6. Луц А.Р., Амосов А.П., Латухин Е.И., Ермошкин А.А. Армирование сплава Al-5%Cu наночастицами карбида титана методом СВС в расплаве. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2017. Т. 19. №1(3). С.529-535.

7. 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 вузов. Цветная металлургия*. 2023. Т.59. №4. С.70-86. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-4-70-86.
8. Kainer K.U., Huang Y.D., Hort N., Dieringa H., Liu Y.L. «Microstructural investigations of interfaces in short fiber reinforced AlSi₁₂CuMgNi composites». *Acta Materialia*. 2005;53:3913-3923. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.04.039.
9. Курганова Ю.А. Разработка и применение дисперсно упрочненных алюмоматричных композиционных материалов в машиностроении. Дисс. на соиск. уч. степени доктора техн. наук. Москва. 2008. 285 С.
10. Миронова Е.В., Затуловский А.С., Косинская А.В., Затуловский С.С. Литые композиционные материалы на основе алюминиевого сплава для автомобилестроения. Киев. 2006. 3 С.
11. Михеев Р.С. Разработка износостойких дисперсно-наполненных композиционных материалов и покрытий из них. Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. М.: МИСиС. 2010. 202 С.
12. М.Л. Хазин, Р.А. Апакашев. Новые материалы для деталей горных машин. Горный информационно-аналитический бюллетень. МИАВ. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2023. №12. С.149-163. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_149.
13. Михеев Р. С., Чернышова Т. А. Алюмоматричные композиционные материалы с карбидным упрочнением для решения задач новой техники. М.: Издательская группа URSS, 2013. 360 С. ISBN 978-5-91146-913-9.
14. Adiga K., Herbert M.A., Rao S. S., Shettigar A. «Applications of reinforcement particles in the fabrication of Aluminium Metal Matrix Composites by Friction Stir Processing». *Manufacturing Review*. 2022;9(26):1–17. DOI: 10.1051/mfreview/2022025.
15. Nayak K. C., Rane K. K., Date P. P., Srivatsan T. S. «Synthesis of an Aluminum Alloy Metal Matrix Composite Using Powder Metallurgy: Role of Sintering Parameters». *Applied Science*. 2022;12:8843. DOI: 10.3390/app12178843.
16. Hamid F. S., EL-Nikhaily A., Abd Ellatif H. R., El kady O. A. «Morphology and Mechanical Properties of Al-TiC Nanocomposite Processed via Ball Milling Technique». *International Journal of Materials Technology & Innovation (IJMTI)*. 2021;1:18-29. DOI: 10.21608/ijmti.2021.181121.
17. Maziarz W., Bobrowski P., Wójcik A., Bigos A., Szymański Ł., Kurtyka P., Rylko N., Olejnik E. «Microstructure and Mechanical Properties of In Situ Cast Aluminum Based Composites Reinforced with TiC Nano-Particles». *MSF*. 2020;985:211–217. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.985.211.
18. Mohapatra S., Chaubey A. K., Mishra D. K., Singh S. K. «Fabrication of Al-TiC composites by hot consolidation technique: its microstructure and mechanical properties». *Journal of Materials Research and Technology*. 2016;5(2):117-122. DOI: 10.1016/j.jmrt.2015.07.001.
19. Sohag A. Z., Gupta P., Kondal N., Kumar D., Singh N., Jamwal A. «Effect of ceramic reinforcement on the microstructural, mechanical and tribological behavior of Al-Cu alloy metal matrix composite». *Materials Today Proceedings*. 2020;21:1407–1411. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.179.
20. Veeravalli R. R., Nallu R., Mohammed M. M.-S. «Mechanical and tribological properties of AA7075-TiC metal matrix composites under heat-treated (T6) and cast conditions». *Journal Materres Technol*. 2016;7:377-383. DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.03.011.
21. Uvaraja V.C. «Heat Treatment Parameters to Optimize Friction and Wear behavior of Novel Hybrid Aluminium Composites Using Taguchi Technique». *International Journal of Engineering and Technology*. 2014;6(2):939-947.
22. Шерина Ю.В., Луц А.Р., Качура А.Д., Шигин С.В. Исследование влияния вида флюса на синтез литого композиционного материала АМг2-10%TiC. Транспортное машиностроение. 2023. №7(9). С.40-48. DOI: 10.30987/2782-5957-2023-7-40-48.
23. Меркулова Г.А. Металловедение и термическая обработка цветных сплавов: учеб. пособ. Красноярск. 2008. 312 С.
24. Mohapatra S., Chaubey A. K., Mishra D. K., Singh S. K. «Fabrication of Al-TiC composites by hot consolidation technique: its microstructure and mechanical properties». *Journal of Materials Research and Technology*. 2016;2(5):117-122. DOI: 10.1016/j.jmrt.2015.07.001.
25. Ali M. «Review of stir casting technique and technical challenges for ceramic reinforcement particulate and aluminium matrix composites». *Journal of Silicate Based and Composite Materials*. 2020;6(72):198-204. DOI: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2020.32.
26. Rosso M. «Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties». *Journal of Materials Processing Technology*. 2006;1(175):364-375. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038.
27. Прусов Е.С. Развитие научных основ создания литых комплексно-армированных алюмоматричных композиционных материалов для отливок ответственного назначения. Дисс. на соиск. уч. степени доктора техн. наук. Нижний Новгород. 2023. 365 С.
28. Белов Н.А. Фазовый состав алюминиевых сплавов. Научное издание. М.: Изд. Дом МИСиС. 2009. 392 С. ISBN 978-5-87623-375-2.
29. Аксенов А.А. Оптимизация состава и структуры композиционных материалов на алюминии-

свой и медной основе, получаемых жидкофазными методами и механическим легированием. Дисс. на соиск. уч. степени доктора техн. наук. Москва. 2007. 390 С.

30. Калашников И.Е. Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов.

REFERENCES

1. Kim DY, Choi HJ. Recent developments towards commercialization of metal matrix composites. *Materials (Basel)*. 2020;13(12):2820-2828. DOI: 10.3390/ma13122828.
2. Lovshenco FG, Lozikov IA, Khabibutin AI. High-temperature aluminum composite materials with special physical and mechanical properties produced by mechanical alloying. *Foundry Production and Metallurgy*. 2020;3; 99–111. DOI: 10.21122/16X3-6065-2020-3-99-111.
3. Alam MA, Ya HH, Azeem M, Yusuf M, Soomro IA, Masood F, Shozib IA, Sapuan SM, Akhter J. Artificial neural network modeling to predict the effect of milling time and TiC content on the crystallite size and lattice strain of Al7075-TiC composites fabricated by powder metallurgy. *Crystals*. 2022;12:372–392. DOI: 10.3390/cryst12030372.
4. Shi Q, Mertens R, Dadbakhsh S, Li G, Yang S. In-situ formation of particle reinforced Aluminium matrix composites by laser powder bed fusion of Fe₂O₃/AlSi₁₂ powder mixture using laser melting/remelting strategy. *Journal of Materials Processing Technology*. 2022;299:117357. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117357.
5. Amosov AP, Lutz AR, Latukhin EI, Ermoshkin AA. Application of SHS processes for the production of in situ aluminium matrix composites discretely reinforced with nanosized titanium carbide particles (review). *Izvestiya. Non-ferrous Metallurgy*. 2016;1:39-49. DOI: 10.17073/0021-2016-1-39-49.
6. Lutz AR, Amosov AP, Latukhina EI, Ermoshkin AA. Reinforcing Al-5%Cu alloy with titanium carbide nanoparticles by SHS method in melt. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2017;19(1(3)):529-535.
7. Lutz AR, Sherina YuV, Amosov AP, Kachura AD. Liquid matrix SHS manufacturing and heat treatment of Al-Mg composites reinforced with fine titanium carbide. *Izvestiya. Non-ferrous Metallurgy*. 2023;59(4):70-86. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-4-70-86.
8. Kainer KU, Huang YD, Hort N, Dieringa H, Liu YL. Microstructural investigations of interfaces in short fiber reinforced AlSi₁₂CuMgNi composites. *Acta Materialia*. 2005;53:3913-3923. DOI: 10.1016/j.actamat.2005.04.039.
9. Kurganova YuA. Development and application of dispersed hardened aluminum matrix composites in mechanical engineering [dissertation]. [Moscow (RF)]; 2008.
10. Mironova EV, Zatulovsky AS, Kosinskaya AV, Zatulovsky SS. Cast composites based on aluminum alloy for the automotive industry. Kyev; 2006.
11. Mikheev RS. Development of wear-resistant polymer-filled composites and their coatings [dissertation]. [Moscow (RF)]: MISiS; 2010.
12. Khazin ML, Apakashev RA. New materials for mining machine parts. *MiAB. Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;12:149-163. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_121_0_149.
13. Mikheev RS, Chernyshova TA. Aluminium matrix composites reinforced with carbide for solving problems of new technology. Moscow: URSS Publishing Group; 2013.
14. Adiga K, Herbert MA, Rao SS, Shettigar A. Applications of reinforcement particles in the fabrication of aluminium metal matrix composites by friction stir processing. *Manufacturing Review*. 2022;9(26):1–17. DOI: 10.1051/mfreview/2022025.
15. Nayak KC, Rane KK, Date PP, Srivatsan TS. Synthesis of an aluminum alloy metal matrix composite using powder metallurgy: role of sintering parameters. *Applied Science*. 2022;12:8843. DOI: 10.3390/app12178843.
16. Hamid FS, EL-Nikhaily A, Abd Ellatif HR, El kady OA. Morphology and mechanical properties of Al-TiC nanocomposite processed via ball milling technique. *International Journal of Materials Technology & Innovation (IJMTI)*. 2021;1:18-29. DOI: 10.21608/ijmti.2021.181121.
17. Maziarz W, Bobrowski P, Wójcik A, Bigos A, Szymański Ł, Kurtyka P, Rylko N, Olejnik E. Microstructure and mechanical properties of In situ cast aluminum based composites reinforced with TiC nano-particles». *MSF*. 2020;985:211–217. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.985.211.
18. Mohapatra S, Chaubey AK, Mishra DK, Singh SK. Fabrication of Al-TiC composites by hot consolidation technique: its microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology*. 2016;5(2):117-122. DOI: 10.1016/j.jmrt.2015.07.001.
19. Sohag AZ, Gupta P, Kondal N, Kumar D, Singh N, Jamwal A. Effect of ceramic reinforcement on the microstructural, mechanical and tribological behavior of Al-Cu alloy metal matrix composite. Дисс. на соиск. уч. степени доктора техн. наук. Москва. 2011. 428 С.
31. М. Х. Мохаммед, С. В. Коновалов, И. А. Панченко, Д. Д. Пашкова. Исследование свойств и структуры алюмоматричных композитов, армированных частицами TiO₂. *Ползуновский вестник*. 2022. Т.2. №4. С.7–13. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.001.

- Materials Today Proceedings. 2020;21:1407–1411. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.08.179.
20. Veeravalli RR, Nallu R, Mohammed M M-S. Mechanical and tribological properties of AA7075–TiC metal matrix composites under heat-treated (T6) and cast conditions. *Journal Materres Technol.* 2016;7:377-383. DOI: 10.1016/j.jmrt.2016.03.011.
 21. Uvaraja VC. Heat treatment parameters to optimize friction and wear behavior of novel hybrid aluminium composites using taguchi technique. *International Journal of Engineering and Technology.* 2014;6(2):939-947.
 22. Sherina YuV, Lutz AR, Kachura AD, Shigin SV. Study of the influence of flux type of on the synthesis of cast composite material AMg2-10%TiC. *Transport Engineering.* 2023;7(9):40-48. DOI: 10.30987/2782-5957-2023-7-40-48.
 23. Merkulova GA. *Metallology and heat treatment of non-ferrous alloys: textbook.* Krasnoyarsk; 2008.
 24. Mohapatra S, Chaubey AK, Mishra DK, Singh SK. Fabrication of Al–TiC composites by hot consolidation technique: its microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Research and Technology.* 2016;2(5):117-122. DOI: 10.1016/j.jmrt.2015.07.001.
 25. Ali M. Review of stir casting technique and technical challenges for ceramic reinforcement particulate and aluminium matrix composites. *Journal of Silicate Based and Composite Materials.* 2020;6(72):198-204. DOI: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2020.32.
 26. Rosso M. Ceramic and metal matrix composites: routes and properties. *Journal of Materials Processing Technology.* 2006;1(175):364-375. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.04.038.
 27. Prusov ES. Development of scientific foundations for creating cast complexly reinforced aluminium matrix composites for high-duty castings [dissertation]. [Nizhny Novgorod (RF)]; 2023.
 28. Belov NA. Phase composition of aluminum alloys. Scientific edition. Moscow: MISiS; 2009.
 29. Aksenov AA. Composition and structure optimization of aluminum- and copper-based composites obtained by liquid phase methods and mechanical alloying [dissertation]. [Moscow (RF)]; 2007. 390 P.
 30. Kalashnikov IE. Development of reinforcement and modification methods of aluminium matrix composite structure [dissertation]. [Moscow (RF)]; 2011.
 31. Mohammed MH, Konvalov SV, Panchenko IA, Pashkova DD. Study of the properties and structure of aluminum matrix composites formed by TiO₂ particles. *Polzunovskiy Vestnik.* 2022;2(4):7-13. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2022.4.2.001.

Информация об авторе:

Шерина Юлия Владимировна – аспирант кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», +7(963)913-66-03.

Sherina Yulia Vladimirovna – Postgraduate Student of the Department of Metall Science, Powder Metallurgy, Nanomaterials; phone: +7(963)913-66-03.

**Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2024; принята к публикации 27.02.2024. Рецензент – Макаренко К.В., доктор технических наук, профессор Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 31.01.2024; approved after review on 19.02.2024; accepted for publication on 27.02.2024. The reviewer is Makarenko K.V., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Material Science at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.