

Научная статья

УДК 531

doi: 10.17223/19988621/96/9

Механические свойства композиционных материалов, полученных с применением СВС-порошков Al–TiB₂ методом прямого лазерного выращивания

Владимир Васильевич Промахов¹, Алексей Евгеньевич Матвеев²,
Никита Александрович Шульц³, Владислав Романович Бахмат⁴,
Тимур Эшанкулович Туранов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Томский государственный университет, Томск, Россия

² Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

¹ vvpromakhov@mail.ru

² cool.mr.c@mail.ru

³ schulznikita97@gmail.com

⁴ bakhmatvr@gmail.com

⁵ timur.kb2@icloud.com

Аннотация. Проведены исследования механических свойств композиционных материалов, полученных с применением композиционных порошков Al–TiB₂ методом прямого лазерного выращивания при различном расходе порошка. Установлено, что с увеличением расхода порошка наблюдается снижение твердости и прочности на сжатие композиционных материалов. Такая зависимость напрямую связана с пористостью композиционного материала, которая увеличивается с ростом расхода порошка в процессе лазерного выращивания. Представленные результаты демонстрируют, что использование порошка Al–TiB₂ как основного сырья в процессе прямого лазерного выращивания с расходом порошка 5.1 г/мин позволяет получить композиты с оптимальным показателем твердости и прочности на сжатие для выбранного диапазона изменения скорости расхода порошка. Полученные данные превосходят показатели традиционных сплавов на основе алюминия.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез, порошки, композиционные материалы, алюминий, диборид титана, прямое лазерное выращивание, прочность, твердость

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 20-79-10086-П.

Для цитирования: Промахов В.В., Матвеев А.Е., Шульц Н.А., Бахмат В.Р., Туранов Т.Э. Механические свойства композиционных материалов, полученных с применением СВС-порошков Al–TiB₂ методом прямого лазерного выращивания // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 96. С. 108–117. doi: 10.17223/19988621/96/9

Original article

Mechanical properties of composite materials produced with the use of Al–TiB₂ SHS powders by direct laser deposition

Vladimir V. Promakhov¹, Aleksey E. Matveev², Nikita A. Schulz³,
Vladislav R. Bakhmat⁴, Timur E. Turanov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

² Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

¹ vvpromakhov@mail.ru

² cool.mr.c@mail.ru

³ schulznikita97@gmail.com

⁴ bakhmatvr@gmail.com

⁵ timur.kb2@icloud.com

Abstract. This paper presents a study of the mechanical properties of composite materials produced with the use of Al–TiB₂ powders by direct laser deposition at different powder consumption. With an increase in the powder consumption, a decrease in the hardness and compressive strength of the composite materials is observed. Such a dependence is directly related to the porosity of the composite material, which increases with an expansion of the powder consumption during laser deposition. The use of Al–TiB₂ powder as the main raw material during direct laser deposition with a powder consumption of 5.1 g/min allows the production of composites with the optimal hardness and compressive strength in the selected range of powder consumption variation. The obtained data exceed the characteristics of the traditional aluminum-based alloys.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis, powders, composite materials, aluminum, titanium diboride, direct laser deposition, strength, hardness

Acknowledgments: This study was financially supported by the Russian Science Foundation (grant No. 20-79-10086-П).

For citation: Promakhov, V.V., Matveev, A.E., Schulz, N.A., Bakhmat, V.R., Turanov, T.E. (2025) Mechanical properties of composite materials produced with the use of Al–TiB₂ SHS powders by direct laser deposition. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 96. pp. 108–117. doi: 10.17223/19988621/96/9

Введение

В последние десятилетия технологии аддитивного производства стремительно внедряются в различные области промышленности: автомобильную, авиакосмическую, судостроительную, станкостроительную и др. [1]. Прямое лазерное выращивание является частным случаем аддитивного производства и позволяет изготавливать изделия необходимой геометрии с применением порошковых материалов на металлической основе [2]. По сравнению с традиционными методами механической обработки прямое лазерное осаждение повышает коэффициент использования материалов и скорость изготовления сложнопрофильных деталей [3]. На сегодняш-

ний день работы большого количества авторов сфокусированы на получении новых порошковых материалов для аддитивных технологий [4]. Такие материалы, несомненно, имеют высокую ценность и будут востребованы в различных отраслях промышленности [5]. Наиболее острые проблемы существуют в транспортной промышленности (автомобильная, авиакосмическая, судостроительная), которая должна удовлетворять современным экологическим требованиям [6]. К этим требованиям, несомненно, относятся рациональное потребление топлива и снижение выброса выхлопных газов, которое может быть достигнуто путем снижения веса транспортной конструкции при сохранении прочностных свойств [7, 8].

Композиционные материалы, состоящие из металлической матрицы и керамических частиц, обладают улучшенными физико-механическими свойствами (износостойкость, прочность, твердость и др.) по сравнению с обычными сплавами, широко применяемыми в технологиях лазерного выращивания [9–11]. В нашей предыдущей работе методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) были получены металломатричные композиционные материалы Al–TiB₂ [12]. Структура композитов представлена алюминиевой матрицей (60 мас. %), внутри которой распределены частицы диборида титана (40 мас. %) субмикронного и нанометрового размера. Стоит отметить, что в процессе исследований удалось осуществить переход от лабораторных условий к полупромышленным и синтезировать материалы массой от 1 до 10 кг [13]. Измельченные в порошок СВС-композиты системы Al–TiB₂ применялись в качестве основного сырья для получения консолидированных материалов методом прямого лазерного выращивания. Добавление керамических частиц TiB₂ предположительно позволит повысить физико-механические свойства композитов (прочность, твердость и др.) на основе алюминия относительно его традиционных сплавов. С другой стороны, использование композиционных материалов Al–TiB₂ при производстве изделий транспорта методом прямого лазерного выращивания позволит в значительной степени снизить их массу при сохранении требуемых физико-механических параметров. Следовательно, возникает закономерный вопрос об исследовании механических свойств композиционных материалов, полученных методом прямого лазерного выращивания с применением СВС-порошков Al–TiB₂, а также сравнении этих свойств с традиционными сплавами.

Цель работы – исследование механических свойств композиционных материалов, полученных с применением СВС-порошков Al–TiB₂ методом прямого лазерного выращивания при различном расходе порошка.

Материалы и методы

Механические испытания проводились на композиционных материалах, полученных методом прямого лазерного выращивания с применением СВС-порошков Al–TiB₂. Методика получения исходных композиционных порошков представлена в работе [13]. Параметры прямого лазерного выращивания материалов, а также СЭМ-изображения (сканирующая электронная микроскопия) их структуры представлены в таблице и на рис. 1 соответственно.

Из композиционных материалов Al–TiB₂, полученных прямым лазерным выращиванием, методом электроэрозионной обработки были приготовлены образцы в форме параллелепипеда ($D \times Ш \times В$: $10 \times 5 \times 5$ мм).

Параметры прямого лазерного выращивания

Образец	I	II	III
Диаметр луча в зоне обработки, мм	1.5	1.5	1.5
Мощность, Вт	500	500	500
Расход порошка, г/мин	5.1	6.3	7.5
Смещение X, мм	0.7	0.7	0.7
Смещение Z, мм	0.2	0.2	0.2

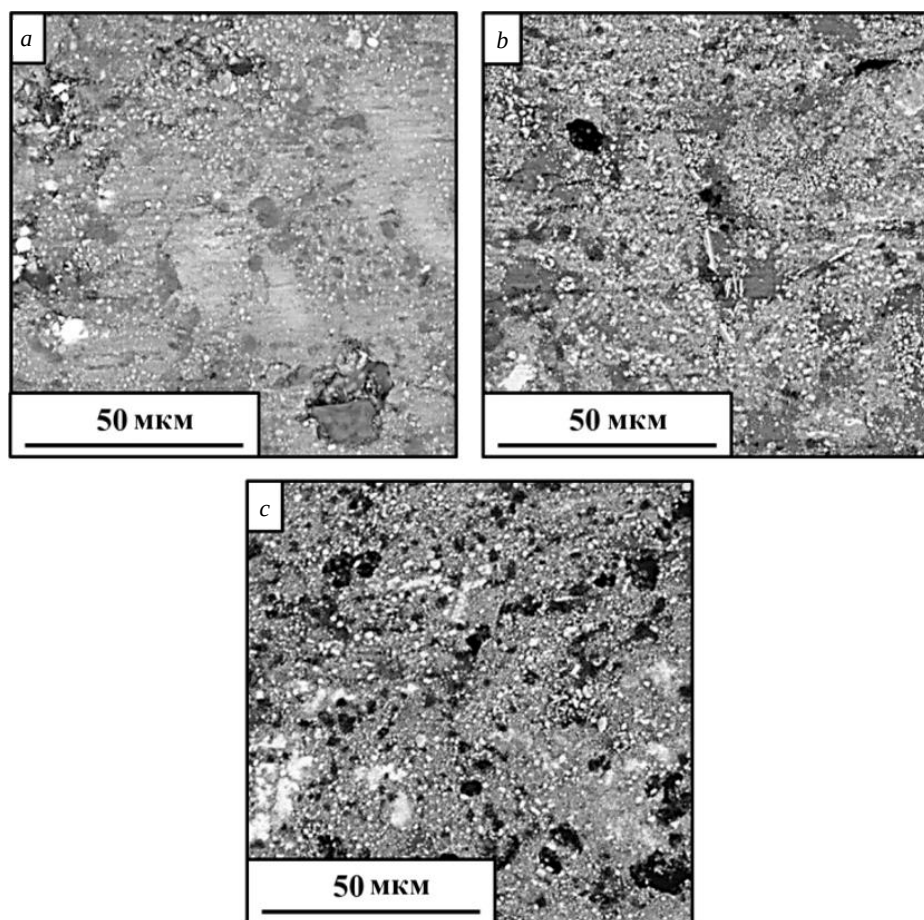


Рис. 1. СЭМ-изображения композиционных материалов, полученных методом прямого лазерного выращивания с применением СВС-порошков Al-TiB₂ при их расходе:

5.1 г/мин (a), 6.3 г/мин (b), 7.5 г/мин (c)

Fig. 1. SEM images of the composite materials obtained by direct laser deposition using Al-TiB₂ SHS powders at a powder consumption of: (a) 5.1, (b) 6.3, and (c) 7.5 g/min

Полученные заготовки подвергались обработке шлифованием и полировкой для создания плоскопараллельных граней. Твердость образцов исследовалась с использованием твердомера Buehler Wilson Micromet 6040. Испытания на предел прочности при сжатии проводились с применением установки Instron 5985.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что полученные образцы наследуют структуру СВС-порошков и состоят из алюминиевой матрицы и керамических частиц TiB_2 . Изменение расхода порошка в процессе прямого лазерного спекания от 5.1 до 7.5 г/мин приводит к изменению размера области когерентного рассеяния рентгеновских лучей (ОКР) фаз Al и TiB_2 , а также среднего размера керамических частиц в структуре материалов. На рис. 2, а представлена схема измерения твердости. Результаты измерений показаны на рис. 2, б. Установлено, что распределение твердости в образцах, полученных при расходе порошка 5.1 г/мин, имеет незначительные отклонения и изменяется в диапазоне от 180 до 220 $\text{HV}_{0.1}$. При изменении расхода порошка до 6.3 и 7.5 г/мин разброс показателей твердости значительно увеличивается, а минимальное значение достигает 70 $\text{HV}_{0.1}$. Среднее значение твердости образцов уменьшается от 198 $\text{HV}_{0.1}$ до 121 $\text{HV}_{0.1}$ с увеличением расхода порошка от 5.1 до 7.5 г/мин соответственно (рис. 2, с).

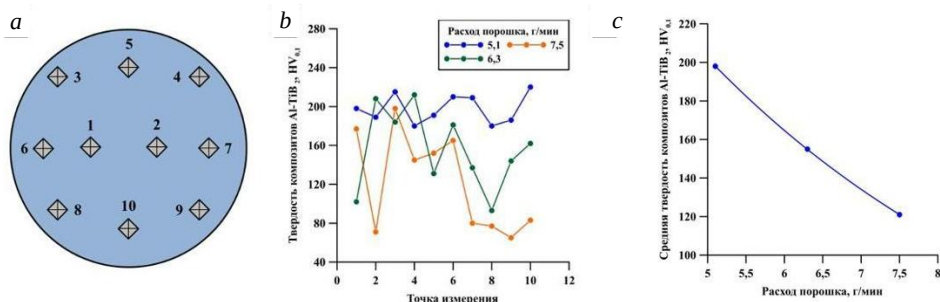


Рис. 2. Схематическое изображение измерения твердости на выбранном участке образцов Al-TiB₂ (а), результаты измерения твердости на образцах (б), зависимость средних значений твердости от расхода порошка (с)

Fig. 2. (a) Schematic representation of hardness measurements on a selected region of Al-TiB₂ samples, (b) hardness measurements on the samples, and (c) average hardness as a function of powder consumption

Испытания на прочность при сжатии проводились на трех образцах, полученных при расходах порошка 5.1, 6.3 и 7.5 г/мин. На рис. 3 представлены диаграммы «напряжение–деформация», полученные в ходе испытаний, а также зависимость предела прочности и максимальной деформации при сжатии от расхода порошка.

Установлено, что максимальный предел прочности при сжатии композиционных материалов уменьшается от 500 до 278 МПа с увеличением расхода порошка от 5.1 до 7.5 г/мин соответственно. При увеличении скорости расхода порошка от 5.1 до 6.3 г/мин максимальная деформация композита при сжатии незначительно увеличивается от 20 до 23%. Дальнейшее увеличение скорости расхода до 7.5 г/мин приводит к уменьшению максимальной деформации до 16%. При измерении прочности на сжатие установлено, что отклонение от среднего значения не превышало 48 МПа для каждого измерения. Для данных по максимальной деформации отклонение от среднего значения не превышало 4% для каждого измерения.

Зависимость твердости и прочности на сжатие композиционных материалов от изменения расхода СВС-порошка Al-TiB₂ напрямую связана с пористостью ком-

позиционного материала, полученного в процессе лазерного выращивания. При увеличении скорости расхода порошка снижается продолжительность локального воздействия лазерного пучка. Это сопровождается уменьшением продолжительности и температуры нагрева частиц, что приводит к снижению глубины их проплавления в процессе лазерного выращивания. Следовательно, увеличение скорости расхода порошка приводит к увеличению пористости. При расходе порошка 5.1 г/мин наблюдалась пористость 4%, при расходе порошка 6.3 г/мин пористость составляла 9%, при расходе порошка 7.5 г/мин – 14%. Большое количество пор способствует более сильному углублению пирамиды при измерении твердости. В процессе сжатия на границах между порами образуются трещины. Распространение трещин между порами приводит к разрушению композитов и, следовательно, к значительному снижению их прочности. Высокая концентрация пор, которые образуются в композитах при расходе порошка 7.5 г/мин, способствует увеличению эффекта хрупкого разрушения, что приводит к снижению максимальной деформации. Увеличение скорости расхода порошка от 5.1 до 6.3 г/мин приводит к незначительному уменьшению среднего размера керамических частиц TiB_2 . Уменьшение размера частиц диборида титана способствует снижению напряжений на их границах с алюминиевой матрицей и, следовательно, приводит к небольшому увеличению максимальной деформации композиционного материала.

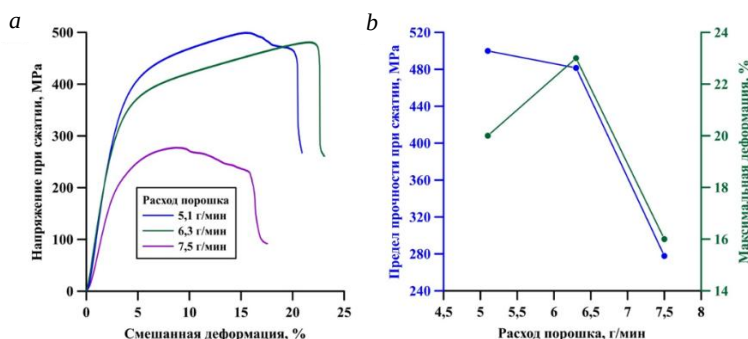


Рис. 3. Диаграммы «напряжение–деформация», полученные при испытаниях композиционных образцов Al-TiB_2 на сжатие (а), зависимость предела прочности и максимальной деформации от расхода СВС-порошка (б)

Fig. 3. (a) Stress–strain diagrams during compression tests for Al-TiB_2 composite samples and (b) ultimate strength and maximum strain as functions of SHS powder consumption

Таким образом, представленные результаты демонстрируют, что использование СВС-порошка на основе системы Al-TiB_2 как основного сырья в процессе прямого лазерного выращивания при скорости расхода порошка 5.1 г/мин позволяет получить композиты с наибольшим показателем твердости и прочности на сжатие. Стоит отметить, что полученные результаты превосходят традиционные сплавы на основе алюминия как по твердости: 6061 (53.1–124.2 HV), 6061-T6 (95.4–121.60 HV, высокопрочный сплав AA7075 (136 HV) [14–17], так и по прочности на сжатие: A356 (323 МПа), экструдированный AZ31 (370 МПа), Mg–Ca–Zn (294 МПа), биметаллический материал из нержавеющей стали 316L и алюминиевого сплава Al12Si (299.4 МПа) [18–21]. Увеличение твердости и прочности на сжатие образцов композиционных материалов, полученных методом прямого лазерного выращи-

вания с применением СВС-порошков на основе системы Al–TiB₂, связано с рядом факторов. Во-первых, высокая твердость диборида титана (25–35 ГПа) в значительной степени способствует увеличению твердости полученных материалов. Во-вторых, в процессе лазерного осаждения частицы диборида титана выступают в качестве центров кристаллизации, что может уменьшить средний размер зерен алюминия и повысить прочность [22]. Таким образом, композиционная структура материала способствует реализации механизма зернограницного упрочнения.

Заключение

Установлено, что с увеличением скорости расхода порошка наблюдается снижение твердости и прочности на сжатие композиционных материалов. Такая зависимость напрямую связана с остаточной пористостью полученных материалов, которая увеличивается с ростом скорости расхода порошка в процессе лазерного выращивания. Представленные результаты демонстрируют, что использование СВС-порошка Al–TiB₂ как основного сырья в процессе прямого лазерного выращивания с расходом порошка 5.1 г/мин позволяет получить композиты с оптимальным показателем твердости и прочности на сжатие для выбранного диапазона изменения скорости расхода порошка. Полученные данные превосходят показатели традиционных сплавов на основе алюминия.

Список источников

1. Furumoto T., Oishi K., Abe S., Tsubouchi K., Yamaguchi M., Clare A.T. Evaluating the thermal characteristics of laser powder bed fusion // *Journal of Materials Processing Technology*. 2022. V. 299. Art. 117384. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117384
2. Simchi A. Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. V. 428 (1–2). P. 148–158. doi: 10.1016/j.msea.2006.04.117
3. Wang X., Gong X., Chou K. Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 2017. V. 231 (11). P. 1890–1903. doi: 10.1177/09544054156198
4. Ezugwu E.O., Bonney J., Yamane Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys // *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 134 (2). P. 233–253. doi: 10.1016/S0924-0136(02)01042-7
5. Philips N.R., Carl M., Cunningham N.J. New opportunities in refractory alloys // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2020. V. 51. P. 3299–3310. doi: 10.1007/s11661-020-05803-3
6. Nyamekye P., Golroudbary S.R., Piili H., Kraslawski A., Luukka P. Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries // *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2023. V. 6. Art. 100112. doi: 10.1016/j.aime.2023.100112
7. Mussatto A., Ahad I.U., Mousavian R.T., Delaure Y., Brabazon D. Advanced production routes for metal matrix composites // *Engineering reports*. 2021. V. 3 (5). e12330. doi: 10.1002/eng2.12330
8. Joost W.J. Reducing vehicle weight and improving US energy efficiency using integrated computational materials engineering // *JOM*. 2012. V. 64. P. 1032–1038. doi: 10.1007/s11837-012-0424-z
9. Hashim J., Looney L., Hashmi M.S.J. Metal matrix composites: production by the stir casting method // *Journal of Materials Processing Technology*. 1999. V. 92. P. 1–7. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00118-1

10. Tjong S.C. Novel nanoparticle-reinforced metal matrix composites with enhanced mechanical properties // *Advanced engineering materials*. 2007. V. 9 (8). P. 639–652. doi: 10.1002/adem.200700106
11. Rawal S.P. Metal-matrix composites for space applications // *JOM*. 2001. V. 53 (4). P. 14–17. doi: 10.1007/s11837-001-0139-z
12. Matveev A., Promakhov V., Schulz N., Bakhmat V., Belchikov I. Structure and phase composition of SHS composites based on Al–Ti–B system with different Al content // *Ceramics International*. 2024. V. 50 (1). P. 503–511. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.10.126
13. Matveev A., Promakhov V., Schulz N., Bakhmat V., Turanov T. Nano- and Submicron-Sized TiB₂ Particles in Al–TiB₂ Composite Produced in Semi-Industrial Self-Propagating High-Temperature Synthesis Conditions // *Metals*. 2024. V. 14 (5). Art. 511. doi: 10.3390/met14050511
14. Sun Q., Yang M., Jiang Y., Lei L., Zhang Y. Achieving excellent corrosion resistance properties of 7075 Al alloy via ultrasonic surface rolling treatment // *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. V. 911. Art. 165009. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.165009
15. Zheng Y.S., Tang G.Y., Kuang J., Zheng X.P. Effect of electropulse on solid solution treatment of 6061 aluminum alloy // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. V. 615. P. 849–853. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.07.062
16. Tan C.F., Radzai S.M. Effect of hardness test on precipitation hardening aluminium alloy 6061-T6 // *Chiang Mai Journal of Science*. 2009. V. 36 (3). P. 276–286.
17. Aliyah A N., Anawati A. Effect of Heat Treatment on Microstructure and mechanical hardness of aluminum alloy AA7075 // *IOP conference series: Materials Science and Engineering*. 2019. V. 541 (1). Art. 012007. doi: 10.1088/1757-899X/541/1/012007
18. Akbari M.K., Baharvandi H.R., Mirzaee O. Nano-sized aluminum oxide reinforced commercial casting A356 alloy matrix: Evaluation of hardness, wear resistance and compressive strength focusing on particle distribution in aluminum matrix // *Composites Part B: Engineering*. 2013. V. 52. P. 262–268. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.04.038
19. Wang Y.N., Huang J.C. The role of twinning and untwinning in yielding behavior in hot-extruded Mg–Al–Zn alloy // *Acta Materialia*. 2007. V. 55 (3). P. 897–905. doi: 10.1016/j.actamat.2006.09.010
20. Селиховкин М.А., Ахмадиева А.А., Жуков И.А., Марченко Е.С., Хрусталеv А.П. Исследование влияния наночастиц алмаза на структуру и механическое поведение сплава Mg–Ca–Zn // *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*. 2022. № 79. С. 152–161. doi: 10.17223/19988621/79/13
21. Zhang Y., Bandyopadhyay A. Influence of compositionally graded interface on microstructure and compressive deformation of 316L stainless steel to Al12Si aluminum alloy bimetallic structures // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2021. V. 13 (7). P. 9174–9185. doi: 10.1021/acsami.0c21478
22. Li W., Yang Y., Liu J., Zhou Y., Li M., Wen S., Wei Q., Yan C., Shi Y. Enhanced nanohardness and new insights into texture evolution and phase transformation of TiAl/TiB₂ in-situ metal matrix composites prepared via selective laser melting // *Acta Materialia*. 2017. V. 136. P. 90–104. doi: 10.1016/j.actamat.2017.07.003
23. Chen L., Sun Y., Li L., Ren Y., Ren X. In situ TiC/Inconel 625 nanocomposites fabricated by selective laser melting: Densification behavior, microstructure evolution, and wear properties // *Applied Surface Science*. 2020. V. 518. Art. 145981. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.145981

References

1. Furumoto T., Oishi K., Abe S., Tsubouchi K., Yamaguchi M., Clare A.T. (2021) Evaluating the thermal characteristics of laser powder bed fusion. *Journal of Materials Processing Technology*. 299. Article 117384. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117384
2. Simchi A. (2006) Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features. *Materials Science and Engineering: A*. 428(1–2). pp. 148–158. doi: 10.1016/j.msea.2006.04.117

3. Wang X., Gong X., Chou K. (2017) Review on powder-bed laser additive manufacturing of Inconel 718 parts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. 231(11). pp. 1890–1903. doi: 10.1177/09544054156198
4. Ezugwu E.O., Bonney J., Yamane Y. (2003) An overview of the machinability of aeroengine alloys. *Journal of Materials Processing Technology*. 134(2). pp. 233–253. doi: 10.1016/S0924-0136(02)01042-7
5. Philips N.R., Carl M., Cunningham N.J. (2020) New opportunities in refractory alloys. *Metalurgical and Materials Transactions A*. 51. pp. 3299–3310. doi: 10.1007/s11661-020-05803-3
6. Nyamekye P., Golroudbary S.R., Piili H., Kraslawski A., Luukka P. (2023) Impact of additive manufacturing on titanium supply chain: Case of titanium alloys in automotive and aerospace industries. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 6. Article 100112. doi: 10.1016/j.aime.2023.100112
7. Mussatto A., Ahad I.U., Mousavian R.T., Delaure Y., Brabazon D. (2021) Advanced production routes for metal matrix composites. *Engineering Reports*. 3(5). Article e12330. doi: 10.1002/eng2.12330
8. Joost W.J. (2012) Reducing vehicle weight and improving US energy efficiency using integrated computational materials engineering. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 64. pp. 1032–1038. doi: 10.1007/s11837-012-0424-z
9. Hashim J., Looney L., Hashmi M.S.J. (1999) Metal matrix composites: production by the stir casting method. *Journal of Materials Processing Technology*. 92. pp. 1–7. doi: 10.1016/S0924-0136(99)00118-1
10. Tjong S.C. (2007) Novel nanoparticle-reinforced metal matrix composites with enhanced mechanical properties. *Advanced Engineering Materials*. 9(8). pp. 639–652. doi: 10.1002/adem.200700106
11. Rawal S.P. (2001) Metal-matrix composites for space applications. *The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. 53(4). pp. 14–17. doi: 10.1007/s11837-001-0139-z
12. Matveev A., Promakhov V., Schulz N., Bakhmat V., Belchikov I. (2024) Structure and phase composition of SHS composites based on Al–Ti–B system with different Al content. *Ceramics International*. 50(1). pp. 503–511. doi: 10.1016/j.ceramint.2023.10.126
13. Matveev A., Promakhov V., Schulz N., Bakhmat V., Turanov T. (2024) Nano- and submicron-sized TiB₂ particles in Al–TiB₂ composite produced in semi-industrial self-propagating high-temperature synthesis conditions. *Metals*. 14(5). Article 511. doi: 10.3390/met14050511
14. Sun Q., Yang M., Jiang Y., Lei L., Zhang Y. (2022) Achieving excellent corrosion resistance properties of 7075 Al alloy via ultrasonic surface rolling treatment. *Journal of Alloys and Compounds*. 911. Article 165009. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.165009
15. Zheng Y.S., Tang G.Y., Kuang J., Zheng X.P. (2014) Effect of electropulse on solid solution treatment of 6061 aluminum alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 615. pp. 849–853. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.07.062
16. Tan C.F., Radzai S.M. (2009) Effect of hardness test on precipitation hardening aluminium alloy 6061-T6. *Chiang Mai Journal of Science*. 36(3). pp. 276–286.
17. Aliyah A.N., Anawati A. (2019) Effect of heat treatment on microstructure and mechanical hardness of aluminum alloy AA7075. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 541(1). Article 012007. doi: 10.1088/1757-899X/541/1/012007
18. Akbari M.K., Baharvandi H.R., Mirzaee O. (2013) Nano-sized aluminum oxide reinforced commercial casting A356 alloy matrix: Evaluation of hardness, wear resistance and compressive strength focusing on particle distribution in aluminum matrix. *Composites Part B: Engineering*. 52. pp. 262–268. doi: 10.1016/j.compositesb.2013.04.038
19. Wang Y.N., Huang J.C. (2007) The role of twinning and untwinning in yielding behavior in hot-extruded Mg–Al–Zn alloy. *Acta Materialia*. 55(3). pp. 897–905. doi: 10.1016/j.actamat.2006.09.010
20. Selikhovkin M.A., Akhmadieva A.A., Zhukov I.A., Marchenko E.S., Khrustalev A.P. (2022) Issledovanie vliyaniya nanochastits almaza na strukturu i mekhanicheskoe povedenie splava

- Mg-Ca-Zn [Investigation of the effect of diamond nanoparticles on the structure and mechanical behavior of Mg-Ca-Zn alloy]. *Vestnik Tomskogo gosudarsvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 79. pp. 152–161. doi: 10.17223/19988621/79/13
21. Zhang Y., Bandyopadhyay A. (2021) Influence of compositionally graded interface on microstructure and compressive deformation of 316L stainless steel to Al12Si aluminum alloy bimetallic structures. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 13(7). pp. 9174–9185. doi: 10.1021/acsami.0c21478
22. Li W., Yang Y., Liu J., Zhou Y., Li M., Wen S., Wei Q., Yan C., Shi Y. (2017) Enhanced nanohardness and new insights into texture evolution and phase transformation of TiAl/TiB₂ in-situ metal matrix composites prepared via selective laser melting. *Acta Materialia*. 136. pp. 90–104. doi: 10.1016/j.actamat.2017.07.003
23. Chen L., Sun Y., Li L., Ren Y., Ren X. (2020) In situ TiC/Inconel 625 nanocomposites fabricated by selective laser melting: Densification behavior, microstructure evolution, and wear properties. *Applied Surface Science*. 518. Article 145981. doi: 10.1016/j.apsusc.2020.145981

Сведения об авторах:

Прوماхов Владимир Васильевич – кандидат технических наук, директор НОЦ «Аддитивные технологии» Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: vvpromakhov@mail.ru

Матвеев Алексей Евгеньевич – младший научный сотрудник НОЦ «Аддитивные технологии» Томского государственного университета; младший научный сотрудник Томского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: cool.mr.c@mail.ru

Шулъц Никита Александрович – научный сотрудник НОЦ «Аддитивные технологии» Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: schulznikita97@gmail.com

Бахмат Владислав Романович – аспирант физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: bakhmatvr@gmail.com

Туранов Тимур Эшанкулович – аспирант физико-технического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: timur.kb2@icloud.com

Information about the authors:

Promakhov Vladimir V. (Candidate of Technical Sciences, Scientific and Educational Center “Additive Technologies” of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: vvpromakhov@mail.ru

Matveev Aleksey E. (Scientific and Educational Center “Additive Technologies” of Tomsk State University; Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation). E-mail: cool.mr.c@mail.ru

Schulz Nikita A. (Scientific and Educational Center “Additive Technologies” of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: schulznikita97@gmail.com

Bakhmat Vladislav R. (Scientific and Educational Center “Additive Technologies” of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: bakhmatvr@gmail.com

Turanov Timur E. (Scientific and Educational Center “Additive Technologies” of Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: timur.kb2@icloud.com

Статья поступила в редакцию 16.04.2024; принята к публикации 01.08.2025

The article was submitted 16.04.2024; accepted for publication 01.08.2025