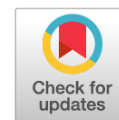


УДК 538.975

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_01\\_107](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_107)

Оригинальное исследование



# Исследование структуры, фазового состава и механических свойств аддитивно выращенного композита на основе Ti-6Al-4V/V<sub>4</sub>C с использованием синхротронного излучения

И.С. Герцель<sup>1,2</sup>, К.Э. Купер<sup>3</sup><sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск, Россия<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия<sup>3</sup> Институт катализа имени Г.К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Создание металлокерамических материалов представляет собой комплексную задачу, где управление структурно-фазовым составом играет ключевую роль в достижении требуемых физико-механических свойств. В работе изучается влияние температуры предварительного нагрева подложки на структурно-фазовый состав и микротвердость титаноматричных композитов, полученных методом прямого лазерного выращивания. Основной проблемой создания металлокерамических композитов является горячее растрескивание. Применение предварительного нагрева подложки является перспективным подходом к снижению термических напряжений и минимизации дефектов, таких как трещины и поры. Разработка технологий формирования бездефектных металлокерамических композитов имеет особую значимость для авиационной и аэрокосмической отрасли.

**Цель** — экспериментально исследовать влияние модуля предварительного нагрева подложки на фазовый состав, микроструктуру и микротвердость металлокерамического композита Ti-6Al-4V/V<sub>4</sub>C, полученного методом прямого лазерного выращивания. На основе комплексного анализа продемонстрировать технологическую эффективность применения подогрева подложки для формирования металлокерамических покрытий без трещин и пор.

**Материалы и методы.** Для создания композитных материалов используется метод прямого лазерного выращивания с применением модуля предварительного нагрева подложки. Для комплексного изучения данного явления используется синхротронное излучение наряду с традиционными методами диагностики микроструктуры.

**Результаты.** Сравнительный анализ микроструктуры, фазового анализа и распределения микротвердости не выявил существенных изменений при использовании предварительного нагрева подложки.

**Выводы.** Экспериментальные данные позволяют сделать вывод о том, что предварительный подогрев подложки может быть использован как модификация метода прямого лазерного выращивания. Использование предварительного нагрева открывает возможность получения бездефектных композитов в широком диапазоне режимов лазерного воздействия.

**Ключевые слова:** титаноматричные композиты (ТМК); прямое лазерное выращивание; синхротронная рентгеновская дифракция; рентгенофазовый анализ (РФА); микротвердость; микроструктура.

## Как цитировать

Герцель И.С., Купер К.Э. Исследование структуры, фазового состава и механических свойств аддитивно выращенного композита на основе Ti-6Al-4V/V<sub>4</sub>C с использованием синхротронного излучения // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 107–114. DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_01\\_107](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_107)

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_01\\_107](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_107)

Original study article

# Study of the structure, phase composition, and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V/B<sub>4</sub>C composite using synchrotron X-ray

Ilya S. Gertsel<sup>1, 2</sup>, Konstantin E. Kuper<sup>3</sup><sup>1</sup> Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia<sup>3</sup> Borekov Institute of Catalysis, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** The development of metal-ceramic materials is a complex task, where phase structure control is key to achieving the required physical and mechanical properties. The study investigates the effects of substrate pre-heating temperature on the structural-phase composition and microhardness of titanium matrix composites manufactured by direct laser deposition. The main issue in the manufacturing of metal-ceramic composites is hot cracking. Substrate preheating is a promising approach to reduce thermal stresses and minimize defects such as cracks and pores. The development of defect-free metal-ceramic composite manufacturing processes is of particular importance for the aircraft and aerospace industries.

**AIM:** To experimentally investigate the effect of the substrate preheating module on the phase composition, microstructure and microhardness of Ti-6Al-4V/B<sub>4</sub>C metal-ceramic composite manufactured by direct laser deposition. Based on a comprehensive analysis, to show that substrate heating may be effectively used to make metal-ceramic coatings free of cracks and pores.

**MATERIALS AND METHODS:** To manufacture composite materials, the direct laser deposition method is used with a substrate preheating module. To fully investigate this phenomenon, synchrotron X-ray is used along with conventional microstructure diagnostic techniques.

**RESULTS:** Comparative analysis of the microstructure, phase analysis and microhardness distribution did not reveal any significant changes during substrate pre-heating.

**CONCLUSIONS:** Experimental data allows to conclude that substrate pre-heating can be used as a version of the direct laser deposition method. Pre-heating contributes to manufacturing defect-free composites in a wide range of laser exposure modes.

**Keywords:** titanium matrix composites (TMC); direct laser deposition; synchrotron X-ray diffraction; XRD phase analysis (XRD); microhardness; misrostructure.

## To cite this article

Gertsel IS, Kuper KE. Study of the structure, phase composition, and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V/B<sub>4</sub>C composite using synchrotron X-ray. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):107–114. DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_01\\_107](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_107)

Received: 03.02.2025

Accepted: 13.02.2025

Published online: 20.03.2025

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день металлические сплавы исчерпывают свой ресурс повышения физико-механических свойств классическими методами, применяемыми в металлургии. В индустрии существует актуальная задача разработки новых материалов и соответствующих изделий на основе металлокерамики, имеющих значительно увеличенные физико-механические характеристики по сравнению с металлическими сплавами.

Титановый сплав Ti-64 является традиционным материалом, широко используемым в аэрокосмической и судостроительной промышленности [1]. Однако Ti-64 обладает высокой чувствительностью к износу.

Наплавка металлокерамических композитов в настоящее время сопряжена с рядом проблем. Одна из них — склонность к дефектообразованию: композиты подвержены развитию таких дефектов, как трещины, поры и участки несплавления [2–4]. Другая — неконтролируемые реакции *in situ*, которые могут вызвать дальнейшие микроструктурные изменения даже после процесса наплавки [5–7].

Несмотря на достижения в области аддитивного производства, наплавка высокоэнтропийных сплавов и металлокерамических смесей по-прежнему сопряжена с трудностями. Подверженность этих материалов горячему растрескиванию подробно описана в литературе [8, 9].

Реакции в системе Ti-B-C приводят к образованию новых фаз, а подача дополнительной энергии в систему «подложка/покрытие» может привести к значительным изменениям. Помимо получения покрытий без трещин за счет снижения температурных градиентов в материале, предварительный нагрев также может влиять на структурно-фазовый состав покрытий, сказываясь на их твердости и износостойкости [10]. Таким образом, этот аспект все еще требует дальнейшего обсуждения, при этом ключевым методом для такого исследования является

синхротронная рентгеновская дифракция. Несмотря на ограниченную доступность и сложность эксплуатации и интерпретации данных, расширенные возможности синхротронного излучения (СИ) необходимы для точного определения фазового состава и наблюдения реакций в процессе лазерного наплавления, что дает возможность получить информацию, недостижимую при использовании лабораторных источников [11]. Этот подход позволяет сформировать представление о микроскопических и структурных изменениях, вызванных изменением температуры предварительного нагрева подложки.

*Цель данного исследования* — изучить структурные изменения, происходящие в зависимости от температуры подложки, и продемонстрировать применимость модуля предварительного нагрева подложки для метода прямого лазерного выращивания.

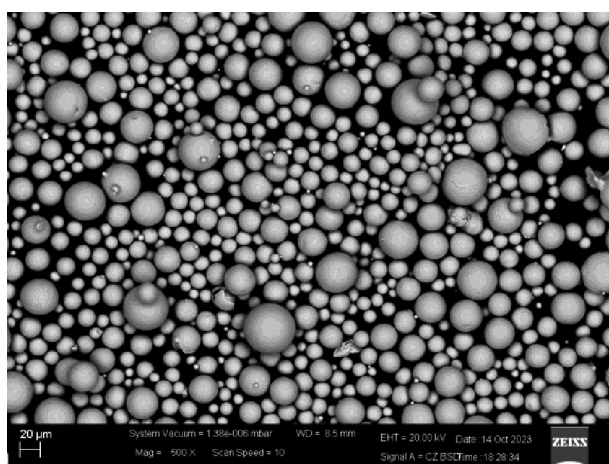
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе используется порошок сплава ВТ-6 марки НОРМИН (фракция 40–80 мкм). Была приготовлена порошковая смесь ВТ-6 с керамическими частицами  $V_4C_3$  (фракция 40–100 мкм) в массовом соотношении 9:1, с помощью V-образного смесителя, время смешивания 1 час. Нанесение порошковой смеси осуществлялось на титановую подложку из сплава ВТ-6 размером 50×50×5 мм.

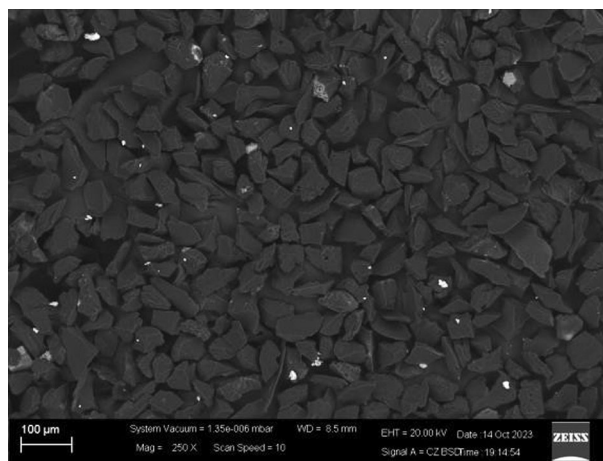
Анализ микроструктуры и элементного состава проводился с использованием сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO MA 15 (Германия). Изображения порошковой смеси, полученные методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), показаны на рис. 1.

Результаты элементного анализа компонентов порошковой смеси приведены в табл. 1.

Метод прямого лазерного выращивания осуществлялся с использованием иттербиевого волоконного лазера IPG Photonics Co. мощностью до 3 кВт и длиной волны 1,07 мкм. Лазерный комплекс был интегрирован



*a*



*b*

Рис. 1. Изображения компонентов порошковой смеси, полученные на электронном микроскопе: *a* — сферический порошок ВТ-6; *b* — керамические частицы  $V_4C_3$ .

Fig. 1. Electron microscope images of powder mixture components: *a*, spherical powder ВТ-6; *b*, ceramic particles  $V_4C_3$ .

Таблица 1. Химический состав компонентов порошковой смеси

Table 1. Chemical composition of powder mixture components

VT-6	Ti	Al	V	Other
Весовой %	87,91	6,73	3,23	0,14
Атомный %	79,23	10,77	2,74	0,11
V <sub>4</sub> C	B	C	Other	
Весовой %	83,37	15,94	0,7	
Атомный %	85,03	14,63	0,34	

с 6-осевым манипулятором Fanuc 710i (Япония). В качестве транспортирующей и защитной среды использовался инертный газ аргон. В ходе эксперимента по лазерной наплавке был использован модуль предварительного нагрева подложки, разработанного в ИТПМ им. С.А. Христиановича СО РАН (диапазон рабочих температур 40–770 °С). В силу проведенной ранее серии экспериментов [10], для предотвращения горячего растрескивания, температура подложки установлена на значении 500 °С. В ходе эксперимента использовался единый энергетический режим, при котором мощность лазерного излучения  $P = 500$  Вт, скорость сканирования  $V = 12$  мм/с, диаметр пятна  $d = 2,7$  мм, а массовый расход  $C = 12$  г/с. На рис. 2 показана фотография экспериментальной установки и схема метода.

Микротвердость была измерена с помощью микротвердомера Wilson Hardness Tukon 1102 (США). Измерения проводились по высоте покрытия методом Виккерса с нагрузкой  $P = 300$  г и временем выдержки  $t = 3$  с. Каждая точка данных представляет собой среднее значение трех тестов на одной высоте. Нулевое значение высоты соответствует границе раздела подложка/покрытие, в то время как отрицательные значения высоты соответствуют измерениям на подложке.

Фазовый состав исследовали методом дифракции рентгеновских лучей с использованием синхротронного излучения на экспериментальной станции «Дифрактометрия в жестком рентгеновском диапазоне» 4-го канала накопительного кольца ВЭПП-3 в центре коллективного пользования «Сибирский центр синхротронного и терагерцового излучения» (СЦСТИ) на базе уникальной исследовательской установки (УРФ) «Комплекс ВЭПП-4 – ВЭПП-2000» Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук [12, 13].

Измерения проводились для образцов толщиной 1 мм, которые были вырезаны из поперечного сечения покрытия после эксперимента с лазерной наплавкой. Дифракционный эксперимент проводился в геометрии Дебая–Шеррера с использованием детекторной системы Mar345 (MarResearch, Германия) на синхротронной длине волны  $0,3685 \pm 0,0006$  Å при диаметре пучка 300 мкм и расстоянии от образца до детектора 246,1 мм. Время накопления дифракционной картины составило 10 минут. Двумерные рентгенограммы были получены с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом Area Diffraction Machine. Идентификация фаз проводилась путем сравнения отражений на полученных 1D-рентгенограммах с их теоретическими положениями,

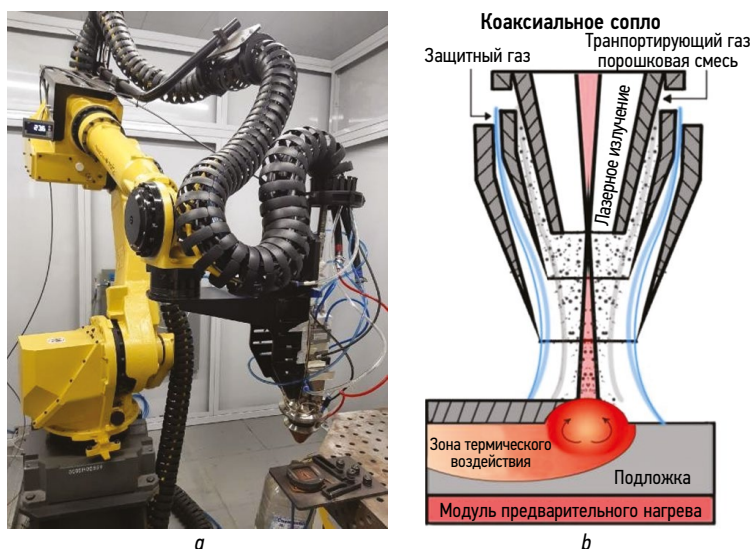


Рис. 2. Оборудование и принцип метода прямого лазерного выращивания: *a* — комплекс для лазерной наплавки; *b* — схема метода.

Fig. 2. Direct laser deposition equipment and principle: *a*, laser deposition unit; *b*, method diagram.



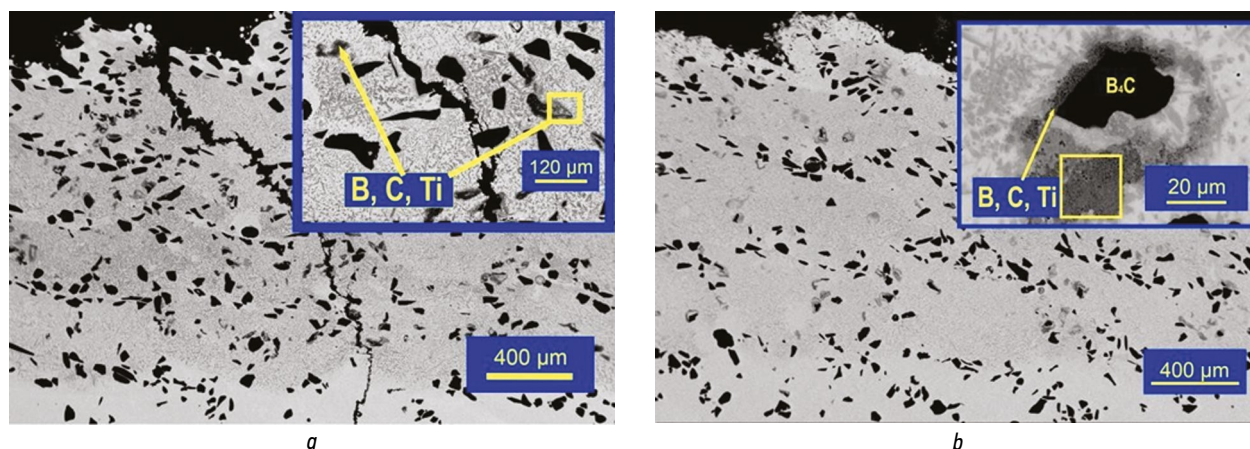


Рис. 3. СЭМ-изображения макро- и микроструктуры покрытий: *a* — полученные без нагрева подложки; *b* — полученные с нагревом подложки до 500 °С.

Fig. 3. Electron microscope images of macro- and microstructure of coatings: *a*, manufactured without substrate heating; *b*, manufactured with substrate heating to 500 °C.

которые были определены на основе структурных данных в базе данных материалов Springer [14, 15].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### Микроструктурные исследования

В ходе эксперимента по лазерной наплавке были получены покрытия в соотношениях 9:1 высотой до 3 мм. Исследование микроструктуры проводилось с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Изображения полученных покрытий представлены на рис. 3.

В подтверждение теоретического прогноза композиты с использованием предварительного нагрева были получены без дефектов, о чем свидетельствуют изображения макроструктуры.

СЭМ-изображения при большем увеличении демонстрируют сходную микроструктуру с предварительным нагревом и без него (см. рис. 3, *a* и *b* соответственно). Частицы карбида бора в обоих случаях подвергаются

растворению, как показано желтыми квадратами. Матрица также имеет аналогичную структуру, содержащую игольчатые и равноосные частицы.

### Дифракционные исследования

Исследование было сосредоточено на изучении влияния предварительного нагрева подложки на структуру аддитивно выращенных покрытий Ti64/V4C. Представлены диаграммы 2θ для образца с одинаковыми энергетическими параметрами при различной температуре подложки.

Интенсивность пиков α-Ti высока по сравнению с β-Ti на всех дифракционных картинах (рис. 4), что соответствует заявленному составу сплава. Дифрактограмма показывает, что пики TiB<sub>2</sub> имеют низкую интенсивность и уширение, что может свидетельствовать о низкой концентрации частиц в объеме, а также об относительно небольшом размере частиц. Более того, интенсивность пиков, соответствующих вторичным фазам TiB, TiC, TiB<sub>2</sub>, по-видимому, аналогична на рис. 4, *a* и *b*.

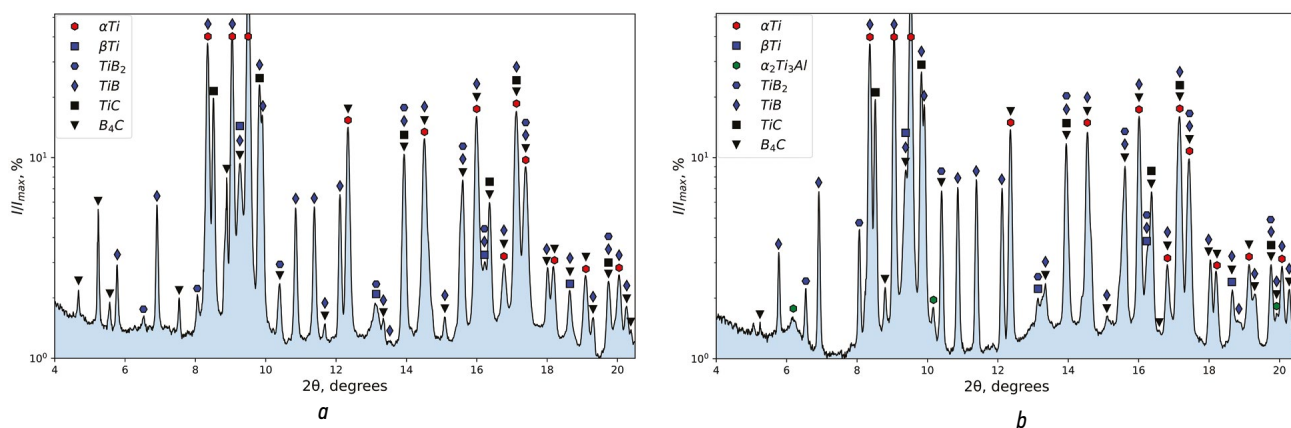


Рис. 4. Дифракционные картины образцов, полученных при температуре подложки: *a* — 23°C; *b* — 500°C.

Fig. 4. Diffraction images of samples obtained with substrate temperature: *a*, 23°C; *b*, 500°C.

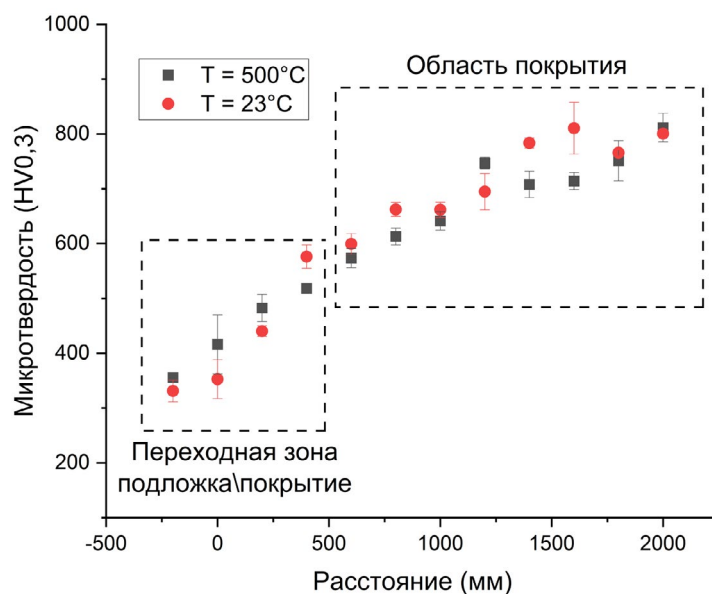


Рис. 5. Распределение микротвердости по высоте покрытия.  
Fig. 5. Microhardness distribution by coating thickness.

Таким образом, очевидно, что дифракционные картины для сравниваемых образцов схожи. Этот факт важен, поскольку если нагрев подложки существенно изменит структуру композита, то этот метод вряд ли будет применим в процессе лазерного наплавления.

### Микротвердость покрытий

Микротвердость — это характеристика материалов, которая четко отражает наличие различных примесей в металлической матрице. Поскольку вторичные фазы, выявленные в ходе исследования, обладают повышенной микротвердостью по сравнению со сплавом Ti-64 (349 HV [16]), полученная металлическая матрица будет становиться более твердой в зависимости от концентрации вторичных фаз. На рис. 5 представлены данные микротвердости по высоте полученных покрытий.

Распределения микротвердости по высоте не изменяются в зависимости от температуры предварительного нагрева подложки. Высокая концентрация вторичных фаз способствует повышению микротвердости металлической матрицы. Это согласуется с данными рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью сканирующей электронной микроскопии было установлено, что микроструктура остается неизменной независимо от наличия или отсутствия предварительного нагрева.

Рентгеновская дифракция синхротронного излучения позволила получить дифракционные картины и данные о фазовом составе композитов. Общие дифракционные картины для образцов с предварительным нагревом подложки и без него были в значительной степени схожими.

Предварительный нагрев подложки оказывает незначительное влияние на микротвердость матрицы, что означает, что повышение температуры подложки не оказывает существенного влияния на интенсивность образования вторичной фазы.

В целом предварительный нагрев подложки оказал незначительное влияние на структуру металлокерамического композита, но позволил получить бездефектные покрытия, продемонстрировав эффективность этого метода для снижения внутренних напряжений. Полученные экспериментальные данные подтверждают применимость предварительного нагрева для лазерной наплавки.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов.** Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: И.С. Герцель — концепция и методология исследования, сбор данных, анализ и интерпретация данных, написание, редактирование и утверждение окончательной версии статьи; К.Э. Купер — подготовка эксперимента по дифракции синхротронного излучения, сбор данных, редактирование и утверждение окончательной версии статьи.

**Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках государственного задания (№ 124021500015-1) ИТПМ СО РАН.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

### ADDITIONAL INFO

**Authors' contribution.** All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation

of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author: I.S. Gertsel, conceptualization and methodology, data collection, data analysis and interpretation, writing, editing, and final approval of the manuscript; K.E. Kuper, preparation of the synchrotron diffraction experiment, data collection, editing and final approval of the manuscript.

**Funding source.** The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 124021500015-1) of the ITAM SB RAS.

**Competing interests.** The authors declare that they have no competing interests.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu S., Shin Y.C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review // *Mater Des.* 2019. Vol. 164. ID 107552. doi: 10.1016/j.matdes.2018.107552
2. Collin M., Rowcliffe D. The morphology of thermal cracks in brittle materials // *J Eur Ceram Soc.* 2002. Vol. 22, N 4. P. 435–445. doi: 10.1016/S0955-2219(01)00319-3
3. Sadhu A., Choudhary A., Sarkar S., et al. A study on the influence of substrate pre-heating on mitigation of cracks in direct metal laser deposition of NiCrSiBC – 60 % WC ceramic coating on Inconel 718 // *Surf Coat Technol.* 2020. Vol. 389. ID 125646. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125646
4. Fu F., Zhang Y., Chang G., Dai J. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors // *Optik.* 2016. Vol. 127, N 1. P. 200–202. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.043
5. Kumar Yadav Nartu M.S.K., Mantri S.A., Pantawane M.V., et al. In situ reactions during direct laser deposition of Ti-B4C composites // *Scr Mater Acta Materialia.* 2020. Vol. 183. P. 28–32. doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.021
6. Jia L., Wang X., Chen B., et al. Microstructural evolution and competitive reaction behavior of Ti-B4C system under solid-state sintering // *J Alloys Compd.* 2016. Vol. 687. P. 1004–1011. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.06.280
7. Bai L.L., Li J., Chen J.L., et al. Effect of the content of B4C on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings fabricated on Ti6Al4V // *Opt Laser Technol.* 2016. Vol. 76. P. 33–45. doi: 10.1016/j.optlastec.2015.07.010
8. Zhou S., Zeng X., Hu Q., Huang Y. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization // *Appl Surf Sci.* 2008. Vol. 255, N 5–1. P. 1646–1653. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.04.003
9. Kou S. Predicting susceptibility to solidification cracking and liquation cracking by calphad // *Metals (Basel).* 2021. Vol. 11, N 9. ID 1442. doi: 10.3390/met11091442
10. Gertsel I.S., Fomin V.M., Gulov M.A., et al. Effect of substrate preheating on the cermet coating structure obtained using additive technologies // *J Appl Mech Techn Phys.* 2023. Vol. 64, N 6. P. 959–963. doi: 10.1134/S0021894423060032
11. Pegues J.W., Melia M.A., Rodriguez M.A., et al. In situ synchrotron X-ray imaging and mechanical properties characterization of additively manufactured high-entropy alloy composites // *J Alloys Compd.* 2021. Vol. 876. ID 159505. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.159505
12. Ancharov A., Manakov A., Mezentsev N., et al. New station at the 4th beamline of the VEPP-3 storage ring // *Nucl Instrum Methods Phys Res A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment.* 2001. Vol. 470, N 1–2. P. 80–83. doi: 10.1016/S0168-9002(01)01029-4
13. Piminov P.A., Baranov G.N., Bogomyagkov A.V., et al. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // *Physics Procedia.* 2016. Vol. 84. P. 19–26. doi: 10.1016/j.phpro.2016.11.005
14. Tretyachenko L. Aluminium – molybdenum – titanium. В кн.: Al-Ti-V ternary phase diagram evaluation / G. Effenberg, editor. MSI materials science international services GmbH, 2014. doi: 10.7121/msi-eureka-10.17143.2.3
15. Rogl P., Bittermann H., Duschaneck H. Boron – carbon – titanium. В кн.: B-C-Ti ternary phase diagram evaluation / G. Effenberg, editor. MSI materials science international services GmbH, 2004. doi: 10.7121/msi-eureka-10.11050.3.3
16. Materials properties handbook: Titanium alloys / R. Boyer, G. Welsch, E.W. Collings, editors. ASM International, 1994. 1176 p.

## REFERENCES

1. Liu S, Shin YC. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review. *Mater Des.* 2019;164:107552. doi: 10.1016/j.matdes.2018.107552
2. Collin M, Rowcliffe D. The morphology of thermal cracks in brittle materials. *J Eur Ceram Soc.* 2002;22(4):435–445. doi: 10.1016/S0955-2219(01)00319-3
3. Sadhu A, Choudhary A, Sarkar S, et al. A study on the influence of substrate pre-heating on mitigation of cracks in direct metal laser deposition of NiCrSiBC — 60 % WC ceramic coating on Inconel 718. *Surf Coat Technol.* 2020;389:125646. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125646
4. Fu F, Zhang Y, Chang G, Dai J. Analysis on the physical mechanism of laser cladding crack and its influence factors. *Optik.* 2016;127(1):200–202. doi: 10.1016/j.ijleo.2015.10.043
5. Kumar Yadav Nartu MSK, Mantri SA, Pantawane MV, et al. In situ reactions during direct laser deposition of Ti-B4C composites. *Scr Mater Acta Materialia.* 2020;183:28–32. doi: 10.1016/j.scriptamat.2020.03.021
6. Jia L, Wang X, Chen B, et al. Microstructural evolution and competitive reaction behavior of Ti-B4C system under solid-state sintering. *J Alloys Compd.* 2016;687:1004–1011. doi: 10.1016/j.jallcom.2016.06.280
7. Bai LL, Li J, Chen JL, et al. Effect of the content of B4C on microstructural evolution and wear behaviors of the laser-clad coatings fabricated on Ti6Al4V. *Opt Laser Technol.* 2016;76:33–45. doi: 10.1016/j.optlastec.2015.07.010
8. Zhou S, Zeng X, Hu Q, Huang Y. Analysis of crack behavior for Ni-based WC composite coatings by laser cladding and crack-free realization. *Appl Surf Sci.* 2008;255(5-1):1646–1653. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.04.003
9. Kou S. Predicting susceptibility to solidification cracking and liquation cracking by calphad. *Metals (Basel).* 2021;11(9):1442. doi: 10.3390/met11091442

**10.** Gertsel IS, Fomin VM, Gulov MA, et al. Effect of substrate preheating on the cermet coating structure obtained using additive technologies. *J Appl Mech Techn Phys.* 2023;64(6):959–963. doi: 10.1134/S0021894423060032

**11.** Pegues JW, Melia MA, Rodriguez MA, et al. In situ synchrotron X-ray imaging and mechanical properties characterization of additively manufactured high-entropy alloy composites. *J Alloys Compd.* 2021;876:159505. doi: 10.1016/j.jallcom.2021.159505

**12.** Ancharov A, Manakov A, Mezentsev N, et al. New station at the 4th beamline of the VEPP-3 storage ring. *Nucl Instrum Methods Phys Res A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment.* 2001;470(1-2):80–83. doi: 10.1016/S0168-9002(01)01029-4

**13.** Piminov PA, Baranov GN, Bogomyagkov AV, et al. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4. *Physics Procedia.* 2016;84:19–26. doi: 10.1016/j.phpro.2016.11.005

**14.** Tretyachenko L. Aluminium–molybdenum–titanium. In: Effenberg G, editor. *Al-Ti-V ternary phase diagram evaluation.* MSI materials science international services GmbH; 2014. doi: 10.7121/msi-eureka-10.17143.2.3

**15.** Rogl P, Bittermann H, Duschaneck H. Boron – carbon – titanium. In: Effenberg G, editor. *B-C-Ti ternary phase diagram.* MSI materials science international services GmbH; 2004. doi: 10.7121/msi-eureka-10.11050.3.3

**16.** Boyer R, Welsch G, Collings EW, editors. *Materials properties handbook: Titanium alloys.* ASM International; 1994. 1176 p.

## ОБ АВТОРАХ

**\*Илья Сергеевич Герцель**, инженер-исследователь;  
адрес: Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1;  
eLibrary SPIN: 8745-5844; ORCID: 0009-0007-6617-6761;  
e-mail: i.gertsel@g.nsu.ru

**Константин Эдуардович Купер**, канд. физ.-мат. наук,  
старший научный сотрудник; eLibrary SPIN: 6006-8498;  
ORCID: 0000-0001-5017-6248;  
e-mail: K.E.Kuper@inp.nsk.su

## AUTHORS' INFO

**\*Ilya S. Gertsel**, research engineer;  
address: 4/1 Institutskaya st, Novosibirsk, 630090, Russia;  
eLibrary SPIN: 8745-5844; ORCID: 0009-0007-6617-6761;  
e-mail: i.gertsel@g.nsu.ru

**Konstantin E. Kuper**, Cand. Sci. (Physics and Mathematics),  
senior research associate; eLibrary SPIN: 6006-8498;  
ORCID: 0000-0001-5017-6248;  
e-mail: K.E.Kuper@inp.nsk.su

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author