

УДК 620.186.5

DOI: 10.15372/PMTF202315295

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА ПОДЛОЖКИ НА СТРУКТУРУ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ, ПОЛУЧЕННОГО С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

И. С. Герцель^{*,**}, В. М. Фомин^{*}, М. А. Гулов^{*},
А. Г. Маликов^{*}, А. А. Филиппов^{*}

^{*} Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия

^{**} Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
Новосибирск, Россия

E-mails: i.gertsel@g.nsu.ru, fomin@itam.nsc.ru, gulovy@mail.ru,
smalik@itam.nsc.ru, filippov@itam.nsc.ru

Проведено исследование влияния предварительного нагрева подложки на структуру полученного методом прямого лазерного выращивания металлокерамического покрытия из сплава ВТ-6, армированного частицами B_4C . Впервые созданы покрытия с массовой долей частиц B_4C , равной 15 %. Показано, что использование нагрева подложки позволяет получать металлокерамические покрытия без трещин. Установлено, что при трибологических испытаниях объем царапин металлокерамического покрытия уменьшился в восемь раз по сравнению с покрытием, содержащим частицы B_4C с массовой долей 10 %.

Ключевые слова: сплав Ti-6Al-4V, предварительный нагрев подложки, карбид бора, твердость, износостойкость, микроструктура

Введение. Сплав ВТ-6 (Ti-6Al-4V) широко используется в аэрокосмической и автомобильной промышленности, что обусловлено его высокой удельной прочностью, жесткостью и коррозионной стойкостью [1–3]. Несмотря на это, данный сплав подвержен износу [4]. Существуют способы повышения износостойкости материала путем армирования металлической матрицы частицами керамики [5–7]. Согласно данным работы [8] для получения покрытия без дефектов можно оптимизировать процесс наплавки, используя порошки с массовой долей частиц B_4C не более 10 %; при увеличении массовой доли до 30 % на всей поверхности покрытия образуются макротрещины.

Для осуществления контроля за градиентами в ванне расплава и уменьшения скорости охлаждения используется предварительный нагрев подложки. С использованием модуля предварительного нагрева можно значительно уменьшить внутренние термические напряжения [9–12]. Предварительный нагрев не только позволяет получать покрытия без

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 21-19-00733) с использованием оборудования центра коллективного пользования “Механика” Института теоретической и прикладной механики СО РАН.

© Герцель И. С., Фомин В. М., Гулов М. А., Маликов А. Г., Филиппов А. А., 2023

трещин, но и оказывает влияние на структурно-фазовый состав покрытий, увеличивая их твердость и износостойкость [10, 13].

Материалы и методика экспериментов. В данной работе применяется метод прямого лазерного выращивания с использованием модуля предварительного нагрева подложки, разработанного в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН (рабочий диапазон температур $40 \div 770$ °С). В качестве источника лазерного излучения был выбран иттербиевый волоконный лазер IPG (мощность излучения до 3 кВт, длина волны 1,06 мкм). Порошковая смесь на основе титана марки НОРМИН ВТ-6 (Ti-6Al-4V) и керамических частиц V_4C с соотношением масс 90 : 10 и 85 : 15 наплавлялась на титановую подложку с размерами $50 \times 50 \times 5$ мм.

С помощью конфокального микроскопа Olympus LEXT OLS 3000 получены оптические снимки поверхности покрытий и определен объем царапин. Исследование микроструктуры, а также элементного состава проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа Zeiss EVO MA 15 с энергодисперсионным анализатором Oxford Instruments X-Max 80 мм². Измерения твердости выполнялись на твердомере ТРТС-10 методом Роквелла с нагрузкой $F = 1471$ Н и временем выдержки $t = 3$ с. Трибологические испытания проводились на трибометре Nanovea N50 с использованием контртела из Si_3N_4 , время испытания составляло $t = 60$ мин, нагрузка — 10 Н.

Результаты исследования и их обсуждение. Проведена оптимизация параметров лазерного воздействия (мощности лазерного излучения P , скорости сканирования V , массового расхода порошка C , диаметра пятна лазера D), влияющих на температуру ванны расплава и ее размеры. В эксперименте получены покрытия толщиной не более 3 мм. Покрытия с массовой долей частиц V_4C 15 %, полученные при оптимальных параметрах лазерного воздействия и при температурах нагрева подложки 23 и 500 °С, показаны на рис. 1.

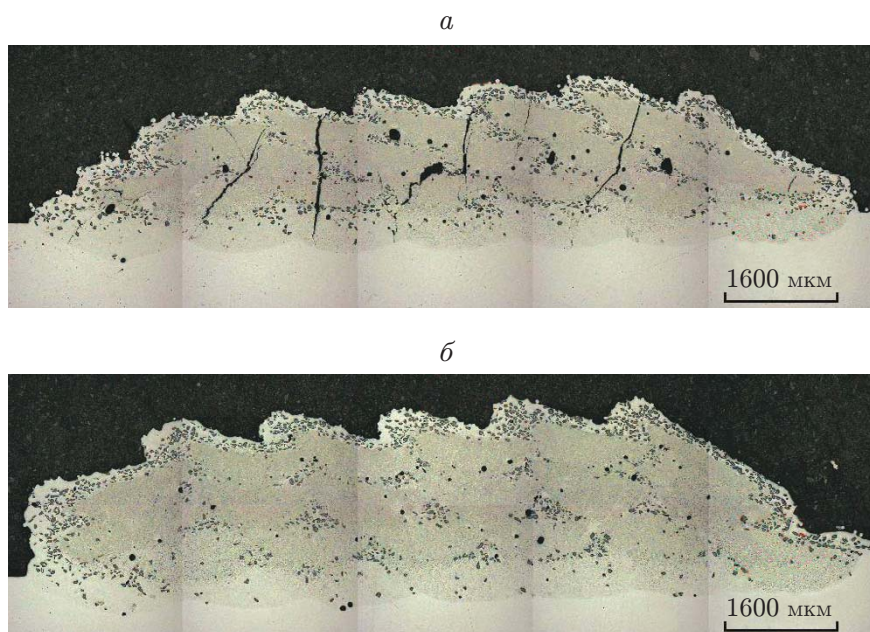


Рис. 1. Покрытия, полученные при $P = 1000$ Вт, $V = 12$ мм/с, $C = 13$ г/мин, $D = 5,4$ мм и различных значениях температуры нагрева:
 a — $T = 23$ °С, $б$ — $T = 500$ °С

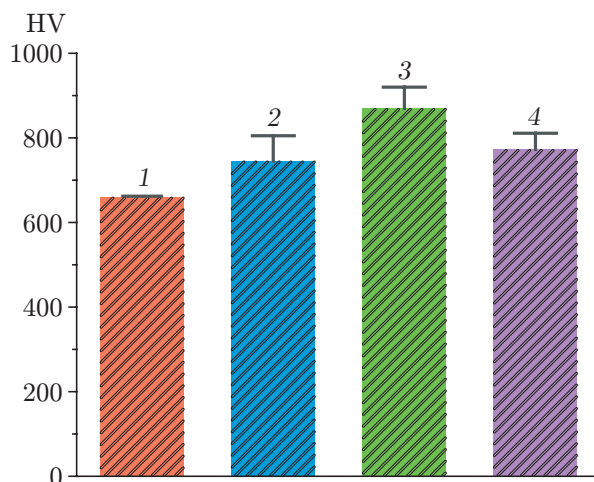


Рис. 2. Измеренная твердость покрытий для различных режимов:

1 — $\omega_{B_4C} = 10\%$, $T = 500^\circ\text{C}$, 2 — $\omega_{B_4C} = 10\%$, $T = 23^\circ\text{C}$, 3 — $\omega_{B_4C} = 15\%$, $T = 500^\circ\text{C}$, 4 — $\omega_{B_4C} = 15\%$, $T = 23^\circ\text{C}$

Особенностью предварительно нагретого образца (см. рис. 1,б) является отсутствие трещин в покрытии, что свидетельствует о снижении внутренних напряжений за счет уменьшения градиента температуры. Внутренние линейные напряжения для гетерогенного материала рассчитываются по формуле [14]

$$\sigma = \frac{\Delta\alpha E_m E_c V_c}{E_m V_m + E_c V_c} (T_0 - T),$$

где $\Delta\alpha$ — разность коэффициентов температурного расширения покрытия и подложки; T_0 — температура до начала воздействия; T — температура нагрева; E_m , E_c — модули Юнга; V_m , V_c — объемные доли металла и частиц керамики соответственно.

Использование предварительного нагрева оказывает влияние на твердость покрытий. Результаты измерения твердости покрытий в различных режимах приведены на рис. 2. При температуре нагрева 500°C и массовой доле частиц B_4C 15 % твердость образца больше по сравнению с его твердостью в других режимах, представленных на рис. 2.

Формирование различных фаз обусловлено изменением степени растворения частиц B_4C в металлической матрице вследствие изменения массовой доли B_4C в порошковой смеси, а также изменением скорости охлаждения. В ходе исследования обнаружены микроструктуры, показанные на рис. 3, и проведен элементный анализ с использованием сканирующего электронного микроскопа (см. таблицу). Исследования показали, что при увеличении массовой доли частиц B_4C до 15 % и температуры нагрева до 500°C размеры и форма частиц изменяются (рис. 3). В ходе трибологических испытаний установлено, что с увеличением температуры нагрева до 500°C и массовой доли частиц B_4C до 15 % объем царапин уменьшается. Это свидетельствует об уменьшении скорости износа покрытия и увеличении его износостойкости. Результаты трибологических испытаний для двух режимов с различной температурой нагрева и массовой долей частиц B_4C 10 и 15 % приведены на рис. 4.

Выводы. Проведено исследование структуры покрытия, полученного методом прямого лазерного выращивания из порошковой смеси на основе титана ВТ-6 (Ti-6Al-4V) и керамических частиц B_4C с соотношением масс 90 : 10 и 85 : 15. С использованием модуля предварительного нагрева впервые получено покрытие с массовой долей частиц B_4C 15 % без трещин. Твердость полученных покрытий с массовой долей частиц B_4C 15 % больше

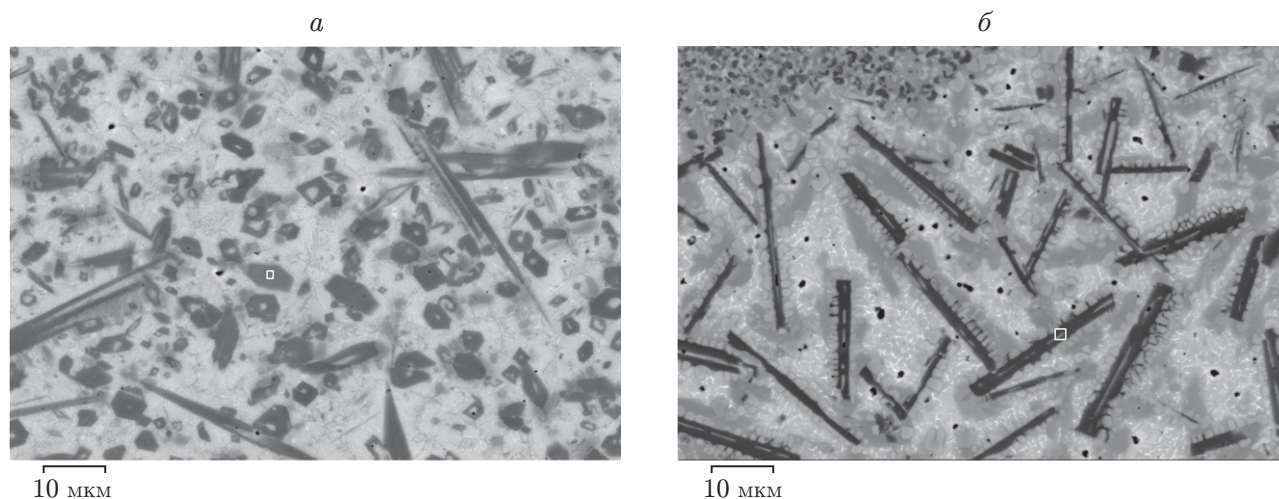


Рис. 3. Микроструктуры, образовавшиеся при наплавке в различных режимах: *a* — $\omega_{\text{B}_4\text{C}} = 10\%$, $T = 23\text{ }^\circ\text{C}$, *б* — $\omega_{\text{B}_4\text{C}} = 15\%$, $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$; выделенные области — фрагменты материала, для которых проводился элементный анализ

Элементный состав фрагментов материала, показанных на рис. 3

Элемент	Рис. 3, <i>a</i>		Рис. 3, <i>б</i>	
	ω , %	A , %	ω , %	A , %
B	28,88	61,19	43,04	73,70
C	3,36	6,42	3,70	5,71
Al	0,11	0,09	0,10	0,07
Ti	65,63	31,39	52,38	20,24
V	2,02	0,91	0,78	0,28

Примечание. ω — массовая доля элемента, A — атомная доля.

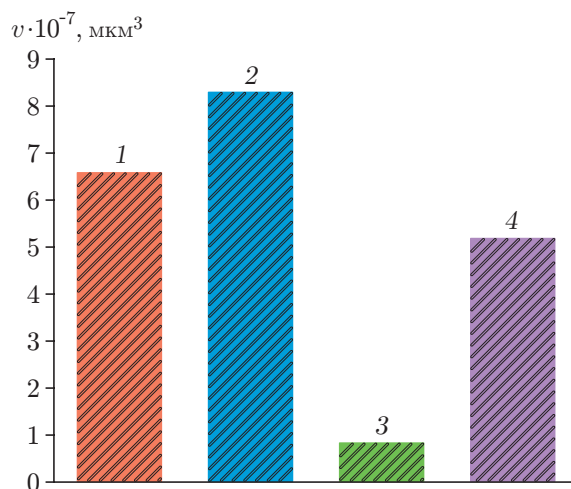


Рис. 4. Объем v царапин на покрытиях после трибологических испытаний в различных режимах:

1 — $\omega_{\text{B}_4\text{C}} = 10\%$, $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$, 2 — $\omega_{\text{B}_4\text{C}} = 10\%$, $T = 23\text{ }^\circ\text{C}$, 3 — $\omega_{\text{B}_4\text{C}} = 15\%$, $T = 500\text{ }^\circ\text{C}$, 4 — $\omega_{\text{B}_4\text{C}} = 15\%$, $T = 23\text{ }^\circ\text{C}$

твердости покрытий с массовой долей частиц B_4C 10 %. Трибологические испытания показали, что для режима $T = 500$ °C, $\omega_{B_4C} = 15$ % скорость износа в восемь раз меньше, чем для режима $T = 500$ °C, $\omega_{B_4C} = 10$ %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Philip J. T., Mathew J., Kuriachen B. Tribology of Ti6Al4V: A review // Friction. 2019. V. 7, N 6. P. 497–536.
2. Liu Z., He B., Lyu T., Zou Y. A review on additive manufacturing of titanium alloys for aerospace applications: directed energy deposition and beyond Ti-6Al-4V // JOM. 2021. V. 73, N 6. P. 1804–1818.
3. Liu S., Shin Y. C. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: A review // Materials Design. 2019. V. 164. 107552.
4. Kermanpur A., Sepehri Amin H., Ziaei-Rad S., et al. Failure analysis of Ti6Al4V gas turbine compressor blades // Engng Failure Anal. 2008. V. 15, N 8. P. 1052–1064.
5. Фомин В. М., Голышев А. А., Маликов А. Г. и др. Создание функционально-градиентного материала методом аддитивного лазерного сплавления // ПМТФ. 2020. Т. 61, № 5. С. 224–234. DOI: 10.15372/PMTF20200523.
6. Фомин В. М., Брусенцева Т. А., Голышев А. А. и др. Создание гетерогенного материала на основе титанового сплава и борида титана методом управляемого лазерного воздействия // ПМТФ. 2021. Т. 62, № 5. С. 58–67. DOI: 10.15372/PMTF20210506.
7. Голышев А. А., Оришич А. М., Филиппов А. А. Законы подобия лазерной наплавки металлокерамических покрытий // ПМТФ. 2019. Т. 60, № 4. С. 194–205. DOI: 10.15372/PMTF20190421.
8. Golyshev A., Orishich A. Microstructure and mechanical characterization of Ti6Al4V– B_4C metal ceramic alloy, produced by laser powder-bed fusion additive manufacturing // Intern. J. Adv. Manufactur. Technol. 2020. V. 109, N 1/2. P. 579–588. DOI: 10.1007/s00170-020-05509-1.
9. Dalaei M. T., Gloor L., Leinenbach C., Wegener K. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD) // Surface Coat. Technol. 2020. V. 384, N 1. 125275.
10. 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 // Surface Coat. Technol. 2020. V. 389. 125646.
11. Soffel F., Papis K. J. M., Bambach M., Wegener K. Laser preheating for hot crack reduction in direct metal deposition of Inconel 738LC // Metals. 2022. V. 12, N 4. 614.
12. Shim D. S., Baek G. Y., Lee E. M. Effect of substrate preheating by induction heater on direct energy deposition of AISI M4 powder // Materials Sci. Engng A. 2017. V. 682. P. 550–562.
13. Ding C., Cui X., Jiao J., Zhu P. Effects of substrate preheating temperatures on the microstructure, properties, and residual stress of 12CrNi2 prepared by laser cladding deposition technique // Materials. 2018. V. 11, N 12. 2401.
14. Nairn J. A., Zoller P. Matrix solidification and the resulting residual thermal stresses in composites // J. Materials Sci. 1985. V. 20, N 1. P. 355–367.

*Поступила в редакцию 20/IV 2023 г.,
после доработки — 2/V 2023 г.
Принята к публикации 29/V 2023 г.*