

УДК 620.186.5  
DOI: 10.15372/PMTF202315294

## ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА ПОДЛОЖКИ НА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЙ СОСТАВ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ

М. А. Гулов\*, И. Е. Витошкин\*, А. А. Филиппов\*,  
А. П. Завьялов\*,\*\* , А. Г. Маликов\*

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

\*\* Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mails: gulovy@mail.ru, igor.vitoshkin.97@mail.ru, filippov@itam.nsc.ru,  
Zav\_Alexey@list.ru, smalik@ngs.ru

Исследован процесс наплавки металлокерамического покрытия на никелевой основе с массовой долей карбида вольфрама 60 %. Изучено влияние предварительного нагрева подложки до температуры 500 °С на интенсивность *in situ* синтеза вторичных керамических частиц, образующихся в результате растворения исходных частиц в металлической матрице. Показано, что предварительный нагрев способствует предотвращению возникновения трещин и пор в покрытии. С использованием синхротронного излучения установлено, что дополнительный нагрев образца в процессе наплавки до температуры 500 °С не приводит к существенному изменению фазового состава получаемого композита.

Ключевые слова: лазерная наплавка, прямое лазерное выращивание, карбид вольфрама, синхротронное излучение, металлокерамика

**Введение.** В настоящее время возрастает интерес к исследованию технологий аддитивного производства, что обусловлено возможностью послойного изготовления с их использованием функциональных изделий из металлов, сплавов и металлических композитов. Применение лазерного излучения в качестве источника энергии в сочетании с другими особенностями данных технологий позволяет изготавливать и восстанавливать покрытия с высокими механическими характеристиками [1–4].

Для улучшения механических свойств покрытий, получаемых с помощью аддитивных лазерных технологий, часто используются металлокерамические смеси с массовой долей керамики до 60 % [5]. Применение подобных смесей позволяет значительно увеличить прочность и износостойкость получаемых покрытий [6, 7], однако большая концентрация керамики может приводить к образованию пор и трещин вследствие различия теплофизических свойств металлических и керамических компонентов. В данной работе для ре-

---

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121030900259-0 с использованием оборудования центра коллективного пользования “Сибирский центр синхротронного и терагерцевого излучения” на базе установки “Комплекс ВЭПП-4-ВЭПП-2000” в Институте ядерной физики СО РАН, а также оборудования центра коллективного пользования “Механика” Института теоретической и прикладной механики СО РАН.

шения проблемы трещинообразования предлагается использовать дополнительный нагрев подложки в процессе наплавки.

**Методы и материалы.** В качестве исходного материала для наплавки была выбрана порошковая смесь самофлюсующегося сплава NiCrBSiFe (массовая доля 40 %) и карбида вольфрама (60 %). Частицы обоих компонентов имели сферическую форму со средним диаметром 100 мкм. Сплав имел следующий химический состав (массовая доля): Ni —  $82,2 \div 86,9$  %, Cr —  $6,8 \div 8,3$  %, Si —  $3,1 \div 3,9$  %, W —  $1,4 \div 1,9$  %, Fe —  $1,7 \div 3,3$  %, C —  $0,1 \div 0,4$  %.

Наплавка проводилась методом прямого лазерного выращивания (direct metal deposition) на подложке из нержавеющей стали марки 12X18H10T размером  $50 \times 50 \times 5$  мм. В ходе эксперимента с помощью разработанного в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН резистивного модуля нагрева подложка нагревалась до температуры 500 °С.

Для визуализации микроструктуры образца применялись конфокальный микроскоп Olympus LEXT OLX 3000 и сканирующий электронный микроскоп Zeiss EVO MA 15, оснащенный энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max 80 mm<sup>2</sup>, с помощью которого проводился элементный анализ микроструктуры покрытия.

Фазовый состав исследовался методом рентгеновской дифракции синхротронного излучения на экспериментальной станции “Жесткая рентгенокопия” канала 8А накопительного кольца ВЭПП-4 [8, 9]. Съёмка образцов толщиной 1 мм с геометрией Дебая — Шеррера проводилась детекторной системой maX345 (Германия) при величине энергии синхротронного излучения 68,5 кэВ для квадратной щели коллиматора размером 300 мкм при расстоянии от образца до детектора 350 мм. Двумерные картины рентгеновской дифракции интегрировались в открытом программном обеспечении “Area Diffraction Machine”, далее идентификация фаз проводилась с использованием открытой базы данных “Crystallography Open Database” [10].

В процессе оптимизации были выбраны следующие параметры лазерной наплавки, используемые при создании покрытий [11]: мощность лазерного излучения — 1000 Вт, скорость подачи порошка — 16 мм/с, расход порошка — 30 г/мин, диаметр лазерного пятна — 5 мм.

**Результаты и обсуждение.** С использованием указанных выше параметров лазерной наплавки были изготовлены два многослойных образца покрытия толщиной до 3 мм. Один образец получен с использованием модуля дополнительного нагрева подложки до температуры 500 °С, второй — без нагрева подложки.

Результаты оптического анализа поперечных шлифов образцов показывают, что в образце, полученном без дополнительного нагрева, присутствует большое количество пор и выпавших в процессе пробоподготовки частиц керамики, а также имеются трещины, проходящие через весь образец (рис. 1,а). Образец, полученный с использованием предварительного нагрева (рис. 1,б), не содержит трещин. Количество выпавших частиц также значительно меньше.

Согласно данным, полученным с помощью сканирующего электронного микроскопа, в металлической матрице образца, полученного без использования нагрева, наблюдается равномерное, без крупных включений, распределение вольфрама (рис. 2,а). Границы частиц WC растворены незначительно, что может обуславливать слабую адгезию металлической матрицы с керамическими частицами и, как следствие, их выпадение в процессе пробоподготовки. В образце, полученном с использованием дополнительного нагрева подложки до температуры 500 °С, керамические частицы растворены в большей степени, наблюдаются крупные (диаметром до 15 мкм) частицы, образовавшиеся в результате происходящего в ванне расплава in situ синтеза. Этому способствовало большее время на-

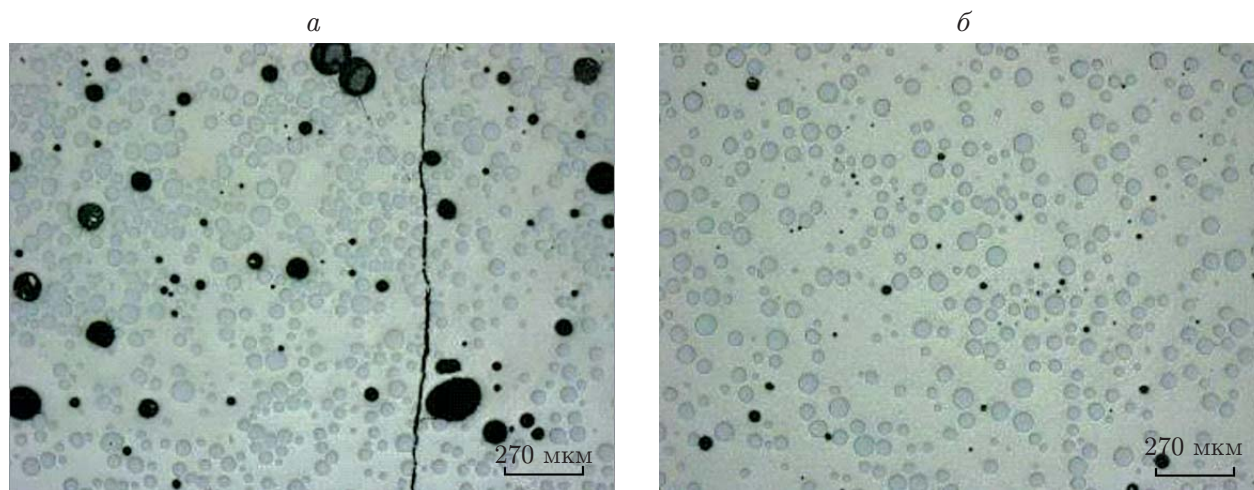


Рис. 1. Макроструктура образцов, полученных без нагрева подложки (а) и с использованием нагрева подложки до температуры 500 °С (б)

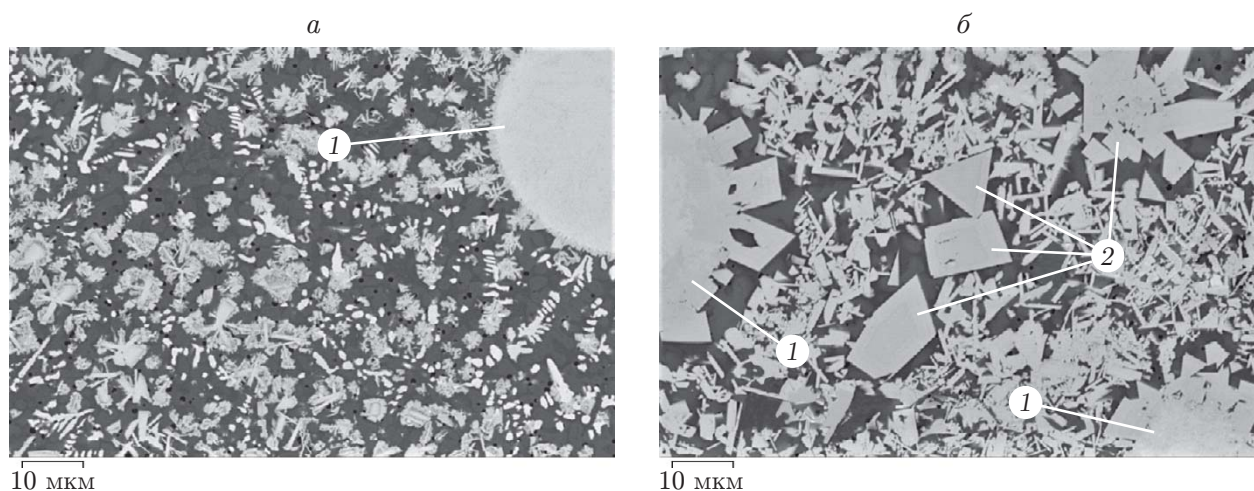


Рис. 2. Микроструктура образцов, полученных без нагрева подложки (а) и с использованием нагрева подложки до температуры 500 °С (б):  
1 — исходные частицы WC, 2 — вторичные частицы WC

хождения ванны расплава в жидкой фазе вследствие уменьшения скорости ее охлаждения в результате дополнительного нагрева подложки.

По результатам анализа, выполненного с помощью энергодисперсионного спектрометра, установлено, что дополнительный нагрев подложки позволяет увеличить степень растворения керамических частиц в металлической матрице, в результате чего атомная доля вольфрама в металлической матрице возрастает с 20,44 до 32,12 % (массовая доля — с 45,47 до 60,25 %).

На рис. 3 представлены рентгенограммы для двух образцов, полученных с использованием предварительного нагрева подложки до температуры 500 °С и без ее нагрева ( $I/I_{\max}$  — относительная интенсивность пиков;  $2\theta$  — угол раскрытия конуса при дифракции на образце). Результаты сравнения рентгенограмм материалов позволяют сделать вывод, что предварительный нагрев не вызвал существенного изменения фазового состава получаемого металлокерамического композита.

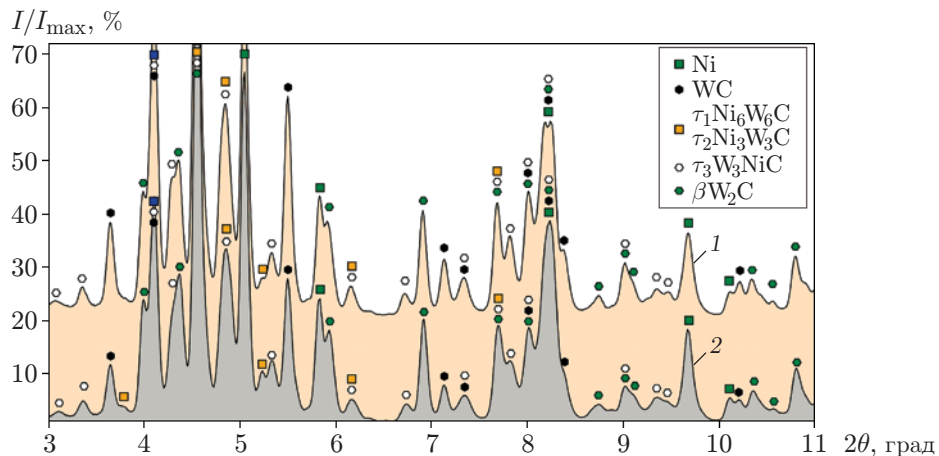


Рис. 3. Рентгенограммы образцов, полученных с использованием нагрева подложки до температуры 500 °С (1) и без ее нагрева (2)

Одной из причин образования трещин в наплавляемом покрытии являются термические напряжения, возникающие вследствие больших перепадов температуры между верхними слоями наплавляемого покрытия (ванной расплава) и нижними, ранее наплавленными слоями. Эти напряжения могут быть описаны уравнением [12]

$$\sigma = \frac{E_c E_s t_s (\alpha_c - \alpha_s)}{(1 - \mu)(E_s t_s + E_c t_c)} \Delta T,$$

где  $E_i$  — модуль Юнга  $i$ -го слоя материала;  $\Delta T$  — разность температур подложки и покрытия;  $t_i$  — толщина  $i$ -го слоя;  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения;  $\mu$  — коэффициент Пуассона; индекс  $c$  соответствует покрытию, индекс  $s$  — подложке.

Добавление керамических частиц карбида вольфрама, температурный коэффициент линейного расширения которого равен  $\alpha = 4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , в никелевый сплав с  $\alpha = 14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (среднее значение для никелевых сплавов) также приводит к увеличению термических напряжений при многократных циклах переплавления, нагрева и остывания материала, характерных для процесса послойной лазерной наплавки. В данной работе использование модуля предварительного нагрева позволило увеличить температуру подложки в процессе лазерной наплавки, уменьшив возникающие напряжения, и предотвратить возникновение трещин.

**Заключение.** С использованием дополнительного нагрева подложки до температуры 500 °С получено металлокерамическое покрытие на никелевой основе (массовая доля керамики 60 %) без трещин.

Впервые с помощью синхротронного излучения изучено влияние дополнительного нагрева подложки до температуры 500 °С на фазовый состав металлокерамического композита, полученного из смеси с массовой долей сферических частиц карбида вольфрама 60 %.

Показано, что причиной образования трещин являются термические напряжения, возникающие в наплавляемом материале вследствие различия температурных коэффициентов линейного расширения металлической матрицы и керамических частиц

## ЛИТЕРАТУРА

1. Hosseini E., Popovich V. A. A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718 // Additive Manufactur. 2019. V. 30. 100877.

2. Lee H., Lim C. H. J., Low M. J., et al. Lasers in additive manufacturing: A review // Intern. J. Precision Engng Manufactur. — Green Technol. 2017. V. 4, N 3. P. 307–322.
3. Li N., Huang S., Zhang G., et al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review // J. Materials Sci. Technol. 2019. V. 35, iss. 2. P. 242–269.
4. Гольшев А. А., Оришич А. М. Влияние параметров лазерного воздействия на формирование ванны расплава металлокерамической смеси  $B_4C$  — Ti-6Al-4V // ПМТФ. 2022. Т. 63, № 2. С. 104–116.
5. 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.
6. Фомин В. М., Гольшев 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.
7. Гольшев А. А., Долгова С. В. Влияние керамического волокна SiC в металломатричном композите на его стойкость при высокоскоростном нагружении // ПМТФ. 2022. Т. 63, № 6. С. 145–149. DOI: 10.15372/PMTF20220616.
8. Piminov P. A., Varanov G. N., Bogomyagkov A. V., et al. Synchrotron radiation research and application at VEPP-4 // Phys. Procedia. 2016. V. 84. P. 19–26.
9. Ancharov A., Manakov A. Yu., Mezentsev N., et al. New station at the 4th beamline of the VEPP-3 storage ring // Nuclear Instruments Methods Phys. Res. A. 2001. V. 470, N 1/2. P. 80–83.
10. Quirós M., Gražulis S., Girdzijauskaitė S., et al. Using SMILES strings for the description of chemical connectivity in the Crystallography Open Database // J. Cheminform. 2018. V. 10, N 1. 23.
11. Гулов М. А., Маликов А. Г., Филиппов А. А. Оптимизация параметров аддитивного выращивания функционально-гетерогенных материалов на основе никеля // Инж.-физ. журн. 2022. Т. 95, № 7. С. 1858–1865.
12. 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.*

---