

УДК 621.373.826

## ВЛИЯНИЕ КЕРАМИЧЕСКОГО ВОЛОКНА SiC В МЕТАЛЛОМАТРИЧНОМ КОМПОЗИТЕ НА ЕГО СТОЙКОСТЬ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ

А. А. Голышев, С. В. Долгова

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия  
E-mails: alexgol@itam.nsc.ru, svetlanadolgova99@gmail.com

Предложена методика изготовления металлического композиционного материала из титанового сплава Ti64, армированного керамическими волокнами SiC, с использованием технологии поверхностной лазерной наплавки. Изучено влияние параметров лазерного воздействия на форму единичного трека. Проведены исследования стойкости формируемого композитного материала при высокоскоростном соударении. Показано, что для образца, армированного керамическими волокнами, глубина кратера в подложке на 37 % меньше, чем для образца из сплава Ti64.

**Ключевые слова:** керамическое волокно, SiC, сплав Ti64, поверхностная лазерная наплавка, высокоскоростное соударение.

DOI: 10.15372/PMTF20220616

**Введение.** Композиционные материалы — класс перспективных материалов, в которых основное вещество (матрица) упрочнено армирующим элементом. Для армирования используются материалы различного типа: порошки, непрерывные и дискретные волокна, ленты и т. д. с различным химическим составом [1, 2].

Основной проблемой, возникающей при формировании композиционного материала, является создание изделий сложной формы. В настоящее время при производстве сложных изделий в аэрокосмической и автомобильной промышленности широко используются аддитивные технологии [3, 4]. Применение разнообразных аддитивных методик позволяет изготавливать изделия из различных материалов.

Процесс изготовления композиционного материала, упрочненного армирующими частицами, описан во многих работах [2, 5]. Основные трудности возникают при получении композитов с армирующими волокнами. Для производства полимерного композиционного материала, армированного углеродными волокнами, используется метод аддитивной печати FDM с дополнительной системой подачи волокон [1, 4, 6]. Однако при создании металлокерамических композиционных материалов с помощью аддитивных технологий возникает трудность при укладке волокон. Целью данной работы является разработка аддитивной технологии формирования композиционного металлического материала, армированного волокнами.

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 21-79-10213).

© Голышев А. А., Долгова С. В., 2022

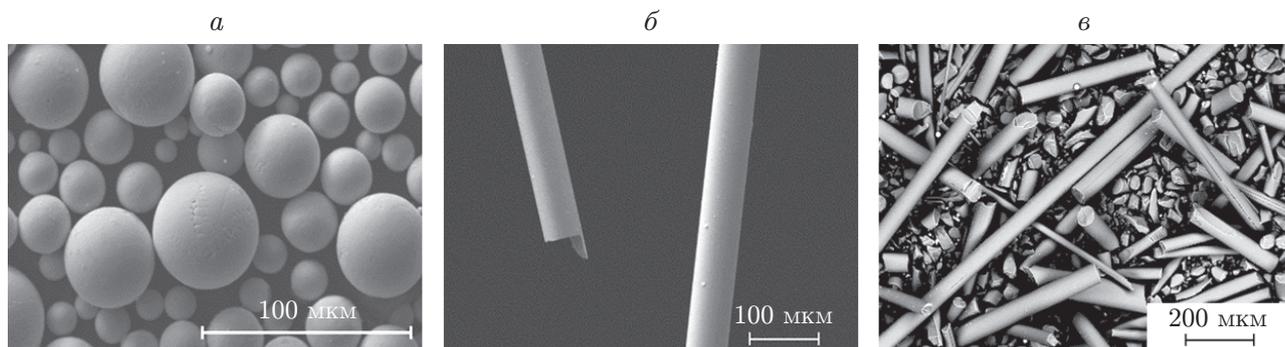


Рис. 1. Порошок Ti64 (*a*), а также исходные (*б*) и раздробленные (*в*) керамические волокна SiC

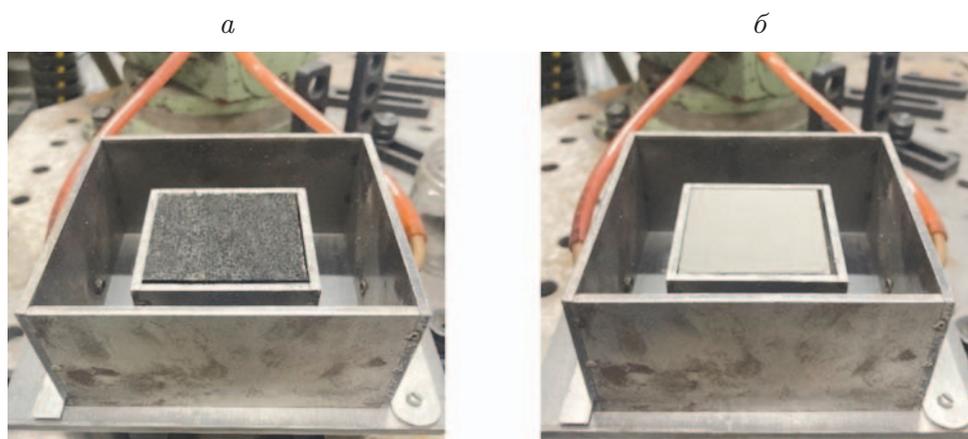


Рис. 2. Рабочая зона установки при нанесении слоев керамических волокон (*a*) и металлического порошка (*б*)

**Методика формирования металлокомпозитов.** Для формирования композитного материала использовались порошок титанового сплава Ti64 (рис. 1, *a*) и керамические волокна, изготовленные из карбида кремния SiC (рис. 1, *б*). В качестве подложки была выбрана пластина из титанового сплава Ti-6,5Al-1,8Zr-1,5Mo с размерами 50 × 50 × 10 мм. Металлокерамический композитный материал формировался с помощью метода поверхностной лазерной наплавки, являющегося аналогом метода селективного лазерного плавления. Сначала керамические волокна размалывались в высокоэнергетической планетарной мельнице “Активатор-2SL” в течение 40 с, а затем просеивались для отделения волокон размером 0,2 ÷ 1,0 мм (рис. 1, *в*).

На подложку укладывался слой раздробленных волокон толщиной 150 мкм (рис. 2, *a*), после чего наносился слой порошка Ti64 толщиной 250 мкм (рис. 2, *б*), а затем металлокерамический комбинированный слой сканировался лазерным излучением с длиной волны 1,07 мкм. Лазерная обработка проводилась в защитной среде (гелий).

Выбирался режим лазерного воздействия (мощность лазерного излучения  $W$ , скорость перемещения  $V$ , диаметр пучка  $d$ , расходы газа и порошка) для получения качественных единичных треков, не содержащих поры, неоднородности, трещины и т. д., после чего выбранный оптимальный режим лазерной обработки использовался для формирования многослойного композиционного материала.

Проведены экспериментальные исследования стойкости создаваемого композиционного материала при высокоскоростном взаимодействии с ударником. Ускорение ударника

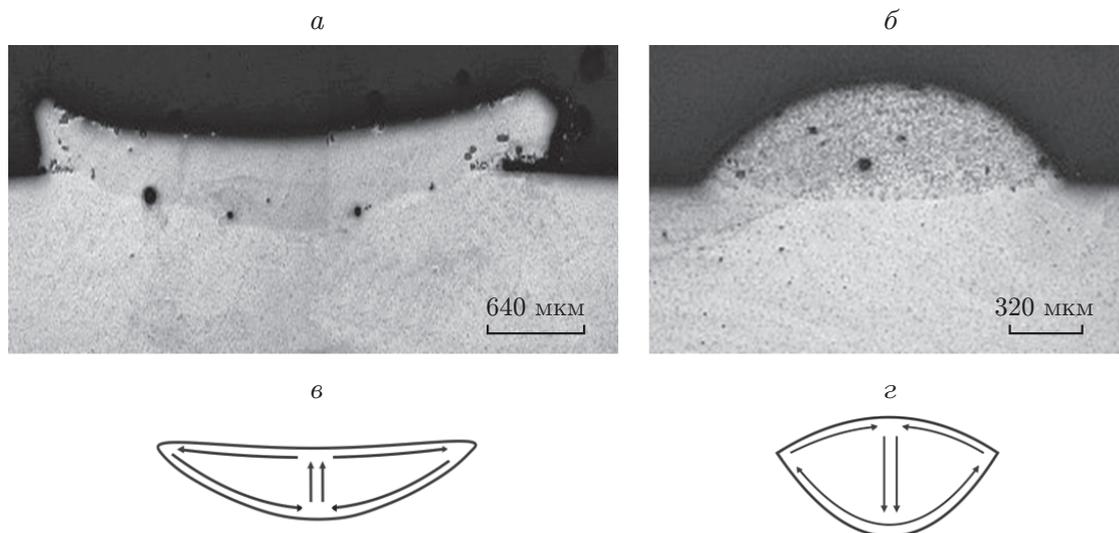


Рис. 3. Поперечные шлифы единичных треков при  $V = 8$  мм/с (*a*),  $V = 32$  мм/с (*б*) и схемы потоков жидкости в ванне расплава при отрицательном (*в*) и положительном (*г*) градиенте поверхностного натяжения

осуществлялось с использованием электродинамического ускорителя масс. В качестве ударника использовался стальной шарик массой 5 г. Ударник и металлокерамическое покрытие взаимодействовали при скорости ударника 1150 м/с.

**Результаты исследования.** На рис. 3 представлены поперечные шлифы единичных треков при различных значениях скорости сканирования ( $W = 800$  Вт,  $d = 2,12$  мм). Видно, что форма единичного трека зависит от скорости  $V$ . При  $V = 8$  мм/с по всей длине наплавляемой дорожки образуется впадина (см. рис. 3, *a*), в то время как при  $V = 32$  мм/с наблюдается линзообразный трек (см. рис. 3, *б*).

В данном случае конвективный массоперенос оказывает более существенное влияние на формирование трека, чем диффузионный массоперенос. Возникновение конвекции обусловлено наличием градиента поверхностного натяжения, от знака которого зависит характер течения жидкости в ванне расплава (см. рис. 3, *в, г*).

Основные параметры лазерной обработки входят в выражение для плотности энергии  $J = 2W/(\pi rV)$  ( $W$  — мощность лазерного пучка, Вт;  $r$  — радиус пятна, мм;  $V$  — скорость сканирования, мм/с). На рис. 4 показаны поперечные шлифы единичных треков при различных значениях  $J$  ( $V = 16$  мм/с). Видно, что при  $J < 15$  Дж/мм<sup>2</sup> глубина проплавления изменяется незначительно (соответствует режиму теплопроводности). В случае  $J > 15$  Дж/мм<sup>2</sup> глубина проплавления единичного трека увеличивается, что свидетельствует о возникновении режима кинжального проплавления.

С использованием результатов определения оптимального режима лазерной обработки были сформированы многослойные покрытия толщиной 3 мм и проведены их испытания на стойкость при высокоскоростном соударении (рис. 5). Для сравнения были подготовлены образцы из титанового сплава методом прямого лазерного осаждения. В результате взаимодействия ударника с покрытиями произошли разрушения различного характера. В образце из сплава Ti64 (см. рис. 5, *a*) образовался кратер с четко выраженными границами, диаметр которого близок к диаметру ударника (5 мм), в то время как в случае образца с керамическим волокном разрушение происходит с образованием диска (см. рис. 5, *б*). Кроме того, при использовании керамического волокна глубина кратера в подложке на 37 % меньше глубины кратера в покрытии из сплава Ti64, что предсказывалось в численном эксперименте [7].

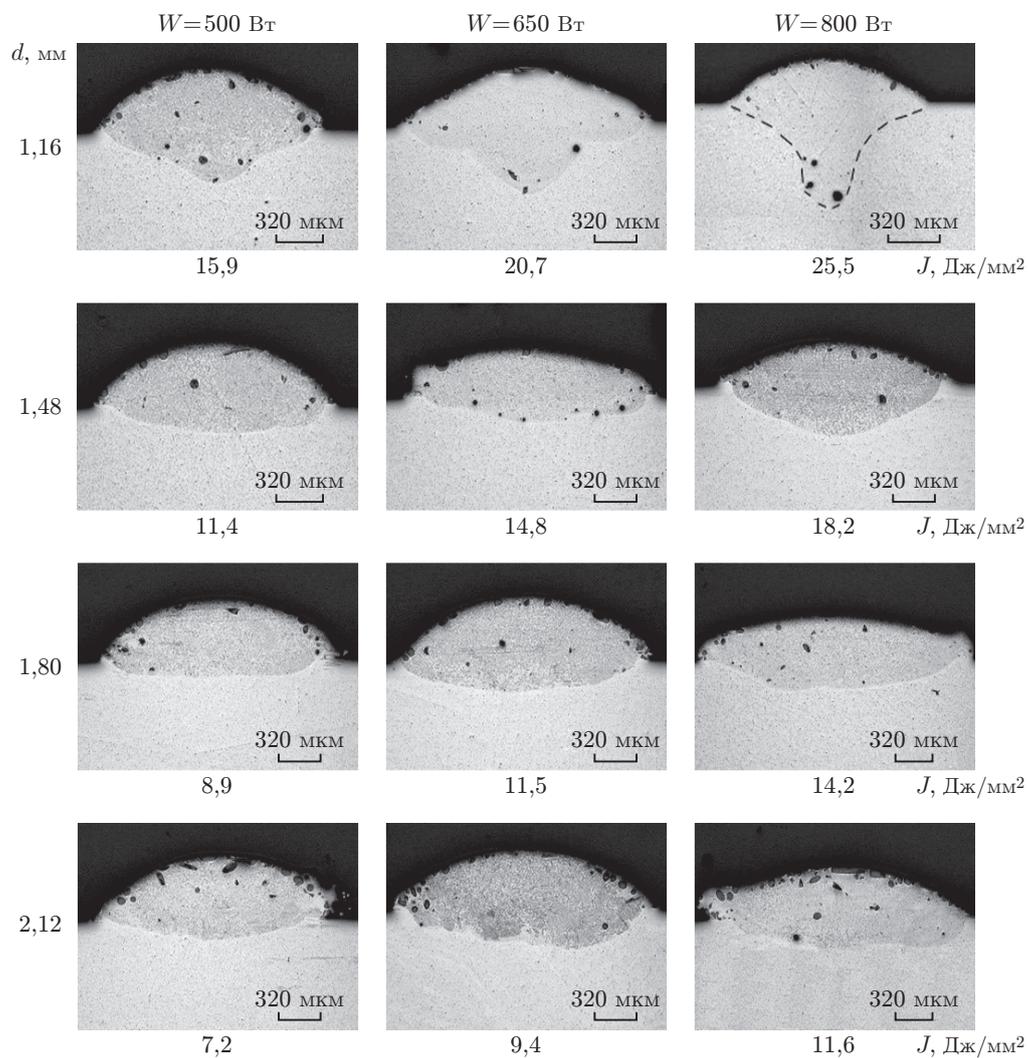


Рис. 4. Поперечные шлифы единичных треков при различных значениях параметров лазерного воздействия

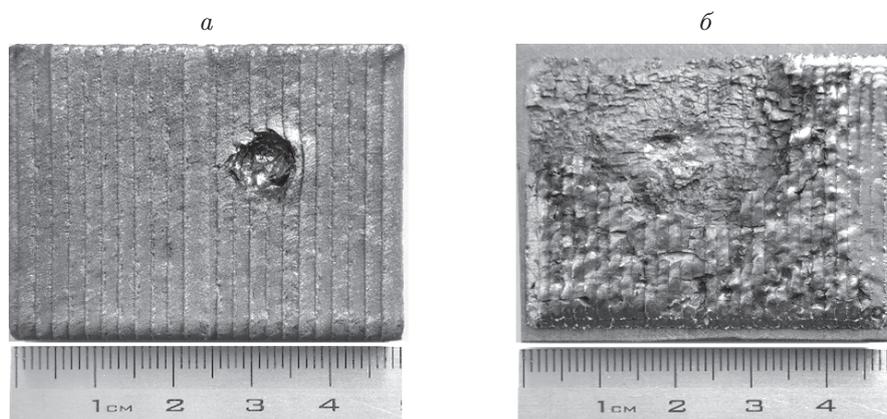


Рис. 5. Покрyтия из сплавов Ti64 (а) и Ti64-SiC (б) после испытаний на удароустойчивость

**Заключение.** Предложена и апробирована методика аддитивного выращивания металлокерамического композитного материала с использованием металлической матрицы, армированной керамическим волокном SiC. Проведены исследования сопротивления формируемых покрытий при высокоскоростном соударении. Показано, что для покрытия, представляющего собой керамическое волокно в металлической матрице, глубина кратера в подложке на 37 % меньше, чем в металлическом покрытии из сплава Ti64.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Khosravani M. R., Reinicke T.** Effects of fiber on the fracture behavior of 3D-printed fiber reinforced nylon // *Procedia Structural Integrity*. 2022. V. 35. P. 59–65. DOI: 10.1016/j.prostr.2021.12.048.
2. **Golyshev A., Orishich A.** Microstructure and mechanical characterization of Ti6Al4V–B<sub>4</sub>C metal ceramic alloy, produced by laser powder-bed fusion additive manufacturing // *Intern. J. Adv. Manufacture Technol.* 2020. V. 109, N 1/2. P. 579–588. DOI: 10.1007/s00170-020-05509-1.
3. **Struzziero G., Barbezat M., Skordos A. A.** Consolidation of continuous fibre reinforced composites in additive processes: A review // *Addit. Manufactur.* 2021. V. 48. 102458. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102458.
4. **Liu G., Xiong Y., Zhou L.** Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications // *Composites Comm.* 2021. V. 27. 100907. DOI: 10.1016/j.coco.2021.100907.
5. **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.
6. **Peng X., Zhang M., Guo Z., et al.** Investigation of processing parameters on tensile performance for FDM-printed carbon fiber reinforced polyamide 6 composites // *Composites Comm.* 2020. V. 22. 100478. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100478.
7. **Краус А. Е., Краус Е. И., Шабалин И. И.** Стойкость керамик к удару в численном эксперименте // *ПМТФ*. 2020. Т. 61, № 5. С. 190–198. DOI: 10.15372/PMTF20200520.

*Поступила в редакцию 21/IV 2022 г.,  
после доработки — 21/IV 2022 г.  
Принята к публикации 25/IV 2022 г.*