



# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Исследование влияния режимов фокусировки лазерного излучения на геометрические и механические свойства металлокерамических треков

Александр Гольшев<sup>1, 2, а, \*</sup>, Анатолий Оришич<sup>1, 2, в</sup>

<sup>1</sup> Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, 4/1, г. Новосибирск, 630090, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова, 1, г. Новосибирск, 630090, Россия

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4243-0602>, alexgol@itam.nsc.ru, <sup>в</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0551-0213>, laser@itam.nsc.ru

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.793

#### История статьи:

Поступила: 23 ноября 2018  
 Рецензирование: 18 января 2019  
 Принята к печати: 29 января 2019  
 Доступно онлайн: 15 марта 2019

#### Ключевые слова:

Лазерная наплавка  
 Оптимизация  
 Металлокерамика  
 Микротвердость  
 Законы подобия  
 Карбид вольфрама

#### Финансирование

Часть работы, связанная с настройкой методики оптимизации наплавки, отработкой технологии получения качественных образцов и поиск обобщенных параметров, выполнена за счет гранта Российского научного фонда, проект № 18-79-00052 «Исследование послойного лазерного формирования функционально-градиентных металлокерамических структур, включающих в себя В4С, TiC и TiB2, используя импульсно-периодическое лазерное излучение».

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Аддитивные технологии (АТ) – способ изготовления изделий путем послойного наращивания материала любой геометрии. Эта технология играет важную роль в изготовлении функциональных изделий или в восстановлении их изношенных частей с высокими прочностными свойствами. Металлокерамические структуры, включающие в себя карбид вольфрама и никелевый сплав, широко используются в трибологических применениях для защиты компонентов, которые подвергаются высокой интенсивности износа, таких как режущий инструмент, сверление и механическая обработка, горная промышленность. **Цель работы:** проведение оптимизации режимов лазерной наплавки металлокерамических единичных треков для получения монолитной наплавленной структуры с максимальной твердостью. **В работе исследовано** влияние лазерного излучения на геометрические и механические характеристики формируемых дорожек при использовании порошковой смеси на основе сплавов никеля 60 % вес. NiCrBSi и карбида вольфрама 40 % вес. WC. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что большое влияние на форму и механические характеристики влияет режим фокусировки лазерного излучения (режим кинжального проплавления или режим теплопроводности) относительно поверхности начального слоя порошковой смеси. Получено, что при использовании в качестве независимой переменной параметра  $p/\sqrt{V}$  для режима кинжального проплавления ( $\Delta f = -3$ ), все данные ширины треков  $w$  и глубины проплава  $Hm$  можно описать едиными зависимостями. Показано, что в наплавленном треке при режиме теплопроводности (режим фокусировки  $\Delta f = \pm 20$ ) наблюдается равномерное распределение керамических частиц, характеризующихся наибольшим значением микротвердости. Получено, что наплавленная металлокерамическая структура обладает в 4...5 раз большим значением микротвердости 850,4 HV0.1 по сравнению с подложкой 178 HV0.1.

**Для цитирования:** Гольшев А.А., Оришич А.М. Исследование влияния режимов фокусировки лазерного излучения на геометрические и механические свойства металлокерамических треков // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 82–92. – doi:10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92.

#### \*Адрес для переписки

Гольшев Александр Анатольевич, к.ф.-м.н., н.с.,  
 Институт теоретической и прикладной механики  
 им. С.А. Христиановича СО РАН  
 ул. Институтская, 4/1,  
 630090, г. Новосибирск, Россия  
 Тел.: 8 923 252-00-12, e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

## Введение

Существующая потребность для промышленности в высокофункциональных легких деталях со сложной геометрической формой привела к увеличению интереса во всем мире к аддитивным технологиям (АТ) [1 и 2]. Благодаря использованию различных видов АТ стало

возможным выращивание детали из широкого диапазона материалов, таких как металлы, полимеры, керамика и т. д. На сегодняшний день АТ нашли множество применений во многих областях промышленности, таких как аэрокосмическая, автомобильная, медицинская, электронная отрасль и др. [3 и 4].

В настоящее время известно более десяти различных способов или технологий послойного синтеза деталей. Например, электронно-лучевое плавление, селективное лазерное спекание, селективное лазерное плавление (SLM) и другие, причем с каждым годом разрабатываются все новые способы. SLM-технология является наиболее широко используемой и универсальной аддитивной технологией. В процессе селективного лазерного плавления сфокусированный лазерный пучок перемещается по заданной траектории и нагревает частички наплавляемого порошка. Таким образом, в месте воздействия лазерного луча происходит расплавление материала и образуется небольшая «ванна» расплава, которая при охлаждении затвердевает. Далее наносится новый слой, и процесс лазерного сканирования повторяется, пока не сформируется 3D-изделие. Характеристики процесса плавления материала и формирование «ванн» расплава зависят от целого ряда параметров, таких как мощность излучения лазера, скорость сканирования, размер пучка, толщина наносимого слоя и др.

Получаемые детали, формируемые SLM-методом, демонстрируют повышенные механические, трибологические и коррозионные свойства по сравнению с их аналогами [5]. Например, в работах [6] сообщается, что выращенная с помощью АТ деталь из нержавеющей стали 316L может соответствовать и даже превосходить механические свойства отливки. Однако для достижения желаемых механических свойств необходимо тщательно контролировать технологические параметры АТ [7].

Несмотря на многие преимущества, SLM-технология имеет некоторые недостатки. Локализованное нагревание и охлаждение вызывает резкий градиент температуры, который, в свою очередь, приводит к образованию термических напряжений [8]. Это может привести к дефектам, таким как образование трещин, деформациям и ухудшению качества поверхности, как

сообщает Vastola et al. [9]. Однако энергетические параметры играют ключевую роль, так как оказывают наибольшее влияние на морфологию расплава и, следовательно, на стабильность процесса, что сказывается на качестве создаваемой детали [10 и 11]. Для достижения желаемых металлургических свойств требуется оптимальный выбор параметров лазерной обработки [12 и 13], а именно мощность лазерного излучения, размер пятна пучка, скорость лазерного сканирования и др.

Для улучшения характеристик формируемых изделий используются металлматричные композитные (ММК) покрытия. Их желаемые механические свойства могут быть получены с помощью соответствующей комбинации подкреплений и металлических матриц. В настоящее время разработаны несколько видов ММК, в том числе на основе Al-, Ti-, Fe-, Cu-, Mg и Ni, армированные либо волокнами, либо частицами карбидов [14].

Покрытия на основе никелевых сплавов характеризуются повышенной коррозионной стойкостью, отличной стойкостью к адгезионному и абразивному износу и значительно расширяют применение в технике [15–17]. Так, покрытия, формируемые из сплавов на основе Ni, широко используются для улучшения характеристик таких изделий, как турбины, износостойкие пластины и рулоны для прокатных станов, поверхность которых подвержена сильным износостойким условиям. Резервом повышения износостойкости покрытий является создание на их основе композиций с карбидным упрочнением, например, с карбидом вольфрама (WC). Карбид вольфрама характеризуется превосходной износостойкостью в сочетании с высокой термостойкостью и хорошей смачиваемостью расплавленным металлом [18]. В результате металлокерамические структуры, включающие в себя карбид вольфрама и никелевый сплав, широко используются в трибологических применениях для защиты компонентов, которые подвергаются высокой интенсивности износа, таких как режущий инструмент, сверление и механическая обработка, горная промышленность [19]. Отметим, что если режимы нанесения металлматричных композитных покрытий достаточно подробно исследованы, то влияние армирования частицами карбидов, особенно при

высокой концентрации керамики, на режимы оптимального лазерного воздействия требуют детального исследования. В настоящей работе проводится оптимизация режимов лазерной наплавки металлокерамических единичных треков для получения монолитной наплавленной структуры с максимальной твердостью. Исследуется влияние лазерного излучения на геометрические и механические характеристики формируемых дорожек при использовании порошковой смеси на основе сплавов никеля NiCrBSi с содержанием карбида вольфрама (WC).

### Методика исследований

На подложку в виде пластины (толщина 5 мм, размер 50 × 50 мм) из нержавеющей стали марки 12X18H10T наплавлялась металлокерамическая порошковая смесь. В качестве наплавляемого материала использовалась порошковая смесь фирмы «Техникорд», состоящая из двух видов порошков: 40 % карбида вольфрама (WC) и 60 % системы Ni–Cr–B–Si. На рис. 1 представлена фотография используемой порошковой смеси. Видно, что частицы керамики WC обладают осколочной формой, а частицы Ni–Cr–B–Si – сферической со средним размером 40 мкм.

Эксперименты проводились на созданном в ИТПМ СО РАН АЛТК «Сибирь 4» [20]. АЛТК «Сибирь 4» включает в себя непрерывный CO<sub>2</sub>-лазер мощностью до 5000 Вт и параметром качества пучка  $K = 0,7$  и компьютерную систему управления лазером и технологическим столом. Лазерное излучение с помощью линзы из ZnSe

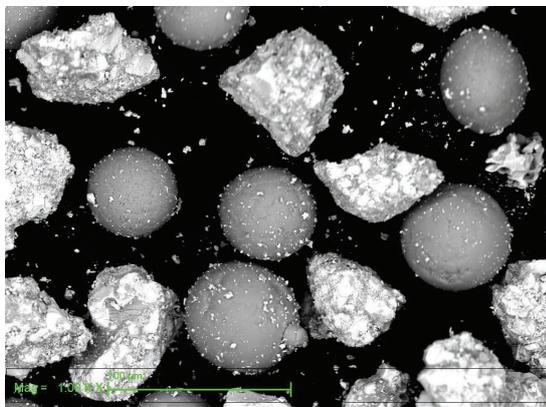


Рис. 1. Фотография порошковой смеси:

40 % WC и 60 % Ni–Cr–Si–B

Fig. 1. Powder mixture photo:

40 % WC, 60 % Ni–Cr–Si–B

с фокусным расстоянием 254 мм фокусировалось в глубь материала, на поверхность и над материалом. Перетяжка фокуса располагалась на разных расстояниях от верхней поверхности подложки (рис. 2), диаметр пятна на поверхности при  $\Delta f = \pm 20$  мм составлял примерно 2 мм. Наплавка осуществлялась в защитной атмосфере гелия, подававшегося через сопло.

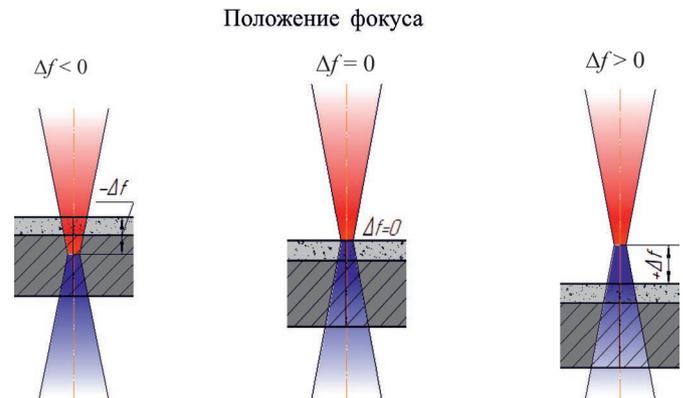


Рис. 2. Схематическое изображение режимов фокусировки

Fig. 2. Schematic of focusing modes

Формируемые треки исследовались на оптическом конфокальном микроскопе Olympus LEXT OLS 3000. Измерения микротвердости проводились по Виккерсу на микротвердомере Wilson Hardness Group Tukon1102 с нагрузкой 100 г.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлены фотографии единичных треков (вид сверху) при разных режимах фокусировки при постоянных остальных параметрах (скорость 0,7 м/мин, мощность 1000 Вт, толщина слоя 1 мм).

Из рис. 3 видно, что в большинстве случаев наплавленный валик обладает нестабильной геометрической формой. Однако следует выделить режимы  $\Delta f = -3, -6$  мм, при которых наплавленные треки имеют однородный вид по всей длине.

Выберем режим фокусировки  $\Delta f = -3$  мм и исследуем микроструктуру наплавочных треков при разных параметрах наплавки. На рис. 4 представлены шлифы поперечных сечений наплавленных дорожек при разной скорости сканирования и мощности лазерного излучения.

На рис. 4 показано, что все треки имеют в зоне проплава поры. Стоит отметить, что для

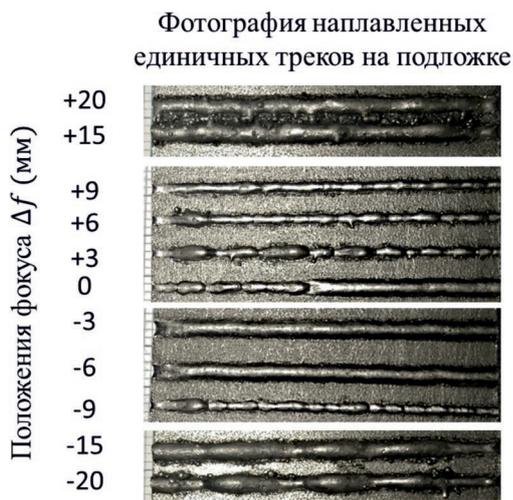


Рис. 3. Фотографии наплавленных единичных треков при переменном положении фокуса  $\Delta f$  ( $V = 0,7$  м/мин и  $P = 1000$  Вт)

Fig. 3. Photos of cladded unit tacks at the variable position of focus  $\Delta f$  ( $V = 0.7$  m/min and  $P = 1,000$  W)

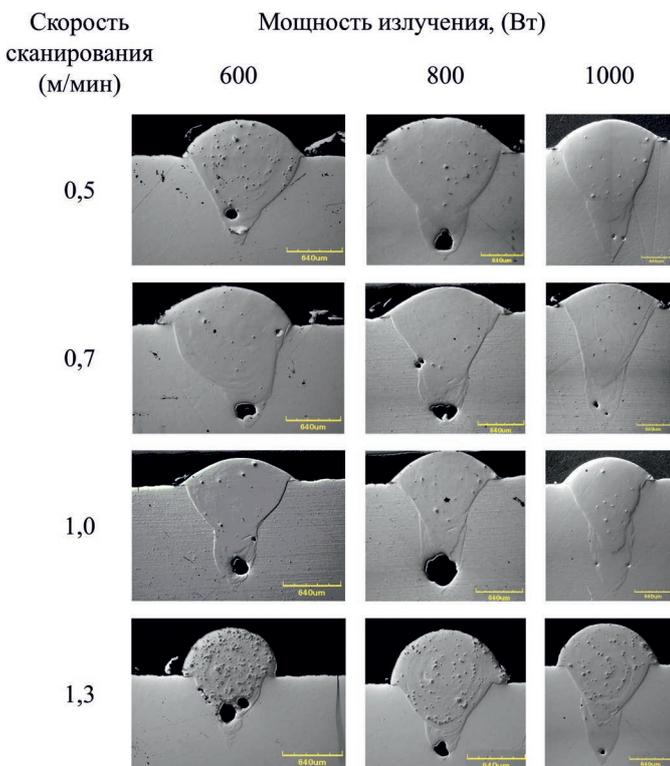


Рис. 4. Влияние мощности и скорости на сечение наплавленного одиночного валика при перетяжке положения фокуса  $\Delta f = -3$  мм

Fig. 4. Influence of power and velocity on the cross section of the unit cladded bed as the focus position waist  $\Delta f = -3$  mm

каждого значения мощности излучения при максимальной скорости сканирования в материале трека содержится больше нерасплавленных частиц карбида вольфрама.

Минимальная зона проплава среди экспериментальных треков, наплавленных при  $\Delta f = -3$  мм, оказалась при максимальной скорости  $V = 1,3$  м/мин и минимальной мощности  $P = 600$  Вт.

Как видно из рис. 5, ширина трека и глубина проплава имеют аналогичные зависимости от параметров наплавки. Экспериментальные точки достаточно разбросаны и не позволяют произвести обобщение данных для получения полной картины зависимости геометрических характеристик наплавливаемых валиков от энергетических параметров. Однако в работах [21 и 22] при исследовании лазерной резки показано, что введение размерных и безразмерных комбинаций позволяет эффективно обобщать полученные данные.

Технология наплавки основана на тепловом воздействии на материал лазерным излучением. Из уравнения теплопроводности можно определить связь температуры материала  $T(x, y, z, t)$  с плотностью мощности лазерного излучения  $q_0$ . Это позволяет ввести понятие порогового значения плотности мощности излучения такого, при котором температура поверхности тела в центре облученной области к моменту окончания воздействия излучения  $\tau$  достигает заданного значения [23].

При анализе полученных данных удобно использовать формулу, определяющую максимальную температуру тела при нагреве его лазерным излучением (на поверхности тела в центре облучаемой области в виде круга радиусом  $r_0$  в момент окончания воздействия [23]):

$$T = \frac{2AP\sqrt{a\tau}}{\pi r_0^2 k} \left( \frac{1}{\sqrt{\pi}} - \text{ierfc} \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_0, \quad (1)$$

где  $A$  – коэффициент поглощения поверхности;  $P$  [Вт] – мощность излучения;  $r_0$  [мм] – радиус пятна лазерного излучения на поверхности;  $\tau$  – длительность воздействия:  $\tau = \frac{2r_0}{V}$ ;  $a$  [ $\text{m}^2/\text{c}$ ] –

температуропроводность материала;  $k$  [ $\text{Вт}/(\text{m} \cdot \text{C}^\circ)$ ] – теплопроводность материала;  $T_0$  [ $^\circ\text{C}$ ] – начальная температура.

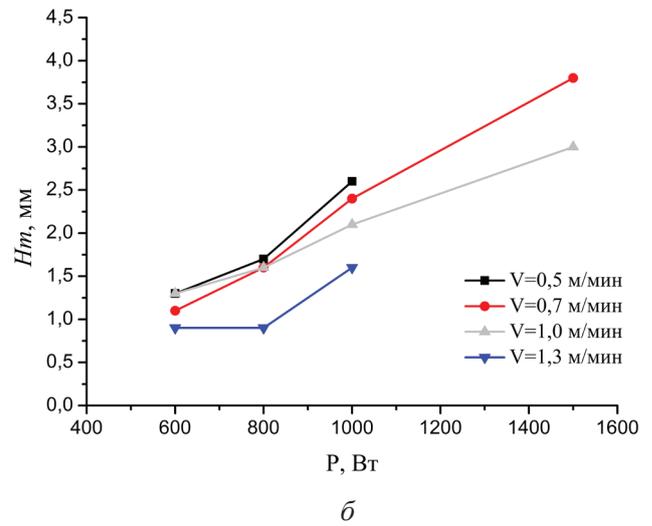
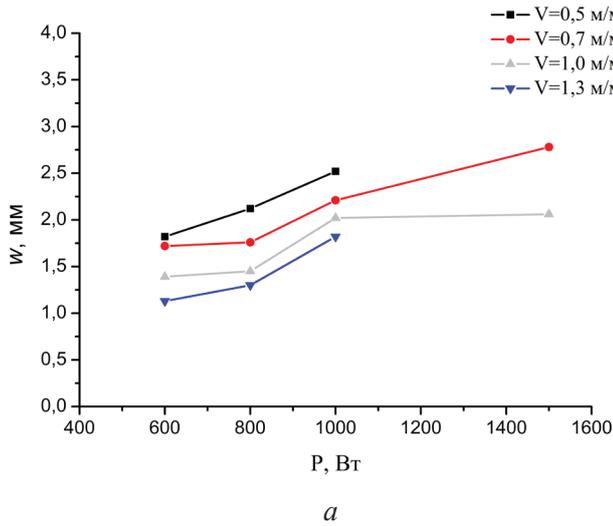


Рис. 5. Зависимость ширины трека  $w$  (а) и глубины проплава трека  $Hm$  (б) от мощности излучения  $P$  при режиме фокусировки  $\Delta f = -3$  мм

Fig. 5. Track width  $w$  (a) and penetration depth  $Hm$  (б) versus the radiation power  $P$  the focusing mode  $\Delta f = -3$  mm

При слабом влиянии теплопроводности  $\frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} > 1$  функцией  $ierfc \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}}$  можно пренебречь, и для температуры получим

$$T = \frac{PA \sqrt{a} \sqrt{2r_0}}{\pi r_0^2 \sqrt{V}} + T_0 \quad (2)$$

Так как в экспериментах большинство параметров оставались неизменными (кроме мощности лазерного излучения и скорости сканирования), то уравнение можно записать в следующем виде:

$$T = \frac{P}{\sqrt{V}} \text{const} + \text{const} \quad (3)$$

Таким образом, особый интерес представляет обобщение полученных данных от комбинационного параметра  $P/\sqrt{V}$ .

На рис. 6 и 7 проведено обобщение экспериментальных данных, которые представлены на рис. 5, в зависимости от параметра  $P/\sqrt{V}$ , определяемого экспериментально контролируруемыми величинами.

Из рис. 6 и 7 видно, что при использовании в качестве независимой переменной параметра  $P/\sqrt{V}$  все данные ширины треков  $w$  и глубины проплава  $Hm$  можно описать едиными зависимостями. При аппроксимации эксперименталь-

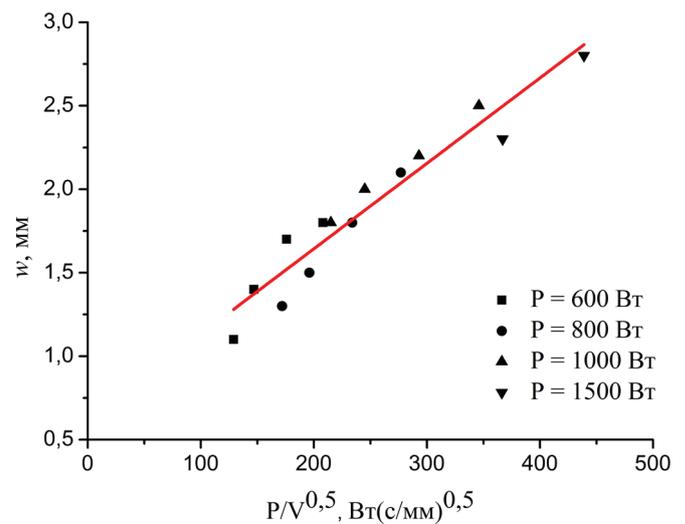


Рис. 6. График ширины трека  $w$  от  $P/\sqrt{V}$

Fig. 6. Graph of the track width  $w$  vs  $P/\sqrt{V}$

ных точек наблюдается линейная зависимость, которую можно записать в виде

$$w = 0,620 + 0,005(P/\sqrt{V}), \quad (4)$$

$$Hm = -0,368 + 0,009(P/\sqrt{V}). \quad (5)$$

Рассмотрим микроструктуру наплавленных треков при разных положениях фокуса. На рис. 8 представлены шлифы поперечных сечений наплавленных дорожек при разных положениях фокуса при постоянной скорости

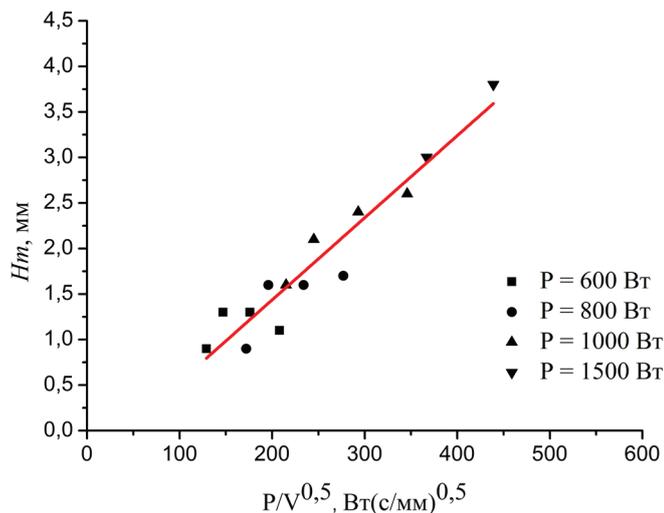


Рис. 7. График глубины проплава трека  $Hm$  от  $P/\sqrt{V}$   
 Fig. 7. Graph of the track penetration depth  $Hm$  vs  $P/\sqrt{V}$

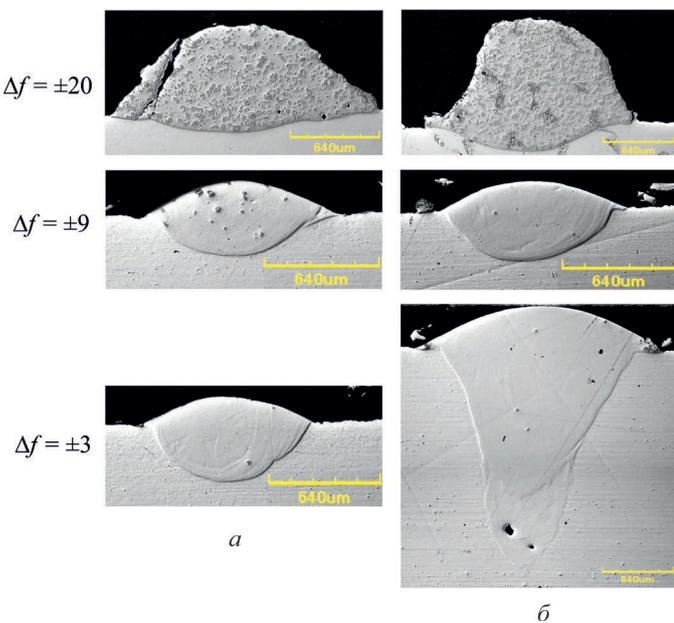


Рис. 8. Фотографии поперечных шлифов единичных треков при переменном положении фокуса  $\Delta f$  ( $V = 0,7$  м/мин,  $P = 1000$  Вт):

$a$  – перетяжка пучка располагается выше поверхности слоя  $\Delta f > 0$ ;  $b$  – перетяжка пучка располагается ниже поверхности слоя  $\Delta f < 0$ )

Fig. 8. Photos of the sections of unit tracks at the variable focus positions  $\Delta f$  ( $V = 0,7$  m/min,  $P = 1,000$  W):

$a$  – the beam waist is above the layer surface  $\Delta f > 0$ ;  $b$  – the beam waist is below the layer surface  $\Delta f < 0$ )

сканирования  $0,7$  м/мин и мощности лазерного излучения  $1000$  Вт.

На рис. 8 показано, что для случая расфокусированного пучка ( $\Delta f = \pm 20, \pm 15$  мм) в матери-

але трека содержится больше нерасплавленных частиц карбида вольфрама по сравнению с режимом, когда на порошок воздействуем сфокусированным пучком. Можно предположить, что частицы карбида вольфрама растворяются в металлической связке при воздействии излучением с высокой плотностью мощности (с высокой интенсивностью излучения).

Определим микротвердость наплавленных металлокерамических треков. Введем параметр – коэффициент перемешивания  $D$ :

$$D = \frac{F_{\text{п}}}{F_{\text{н}} + F_{\text{п}}}, \quad (6)$$

где  $F_{\text{н}}$  – площадь наплава;  $F_{\text{п}}$  – площадь проплава.

На рис. 9 представлены экспериментальные значения микротвердости от коэффициента перемешивания  $D$ . Из графика видно, что с уменьшением коэффициента перемешивания увеличивается микротвердость материала, так, при  $D = 0,76$  число микротвердости равно всего  $330$   $HV0.1$ , а при  $D = 0,12$  достигает  $830$   $HV0.1$ .

Экспериментальные значения представляют собой линейную зависимость и описываются уравнением

$$HV0.1 = 925,372 - 6,722D. \quad (7)$$

На рис. 10 представлена зависимость параметра микротвердости от режима фокусировки

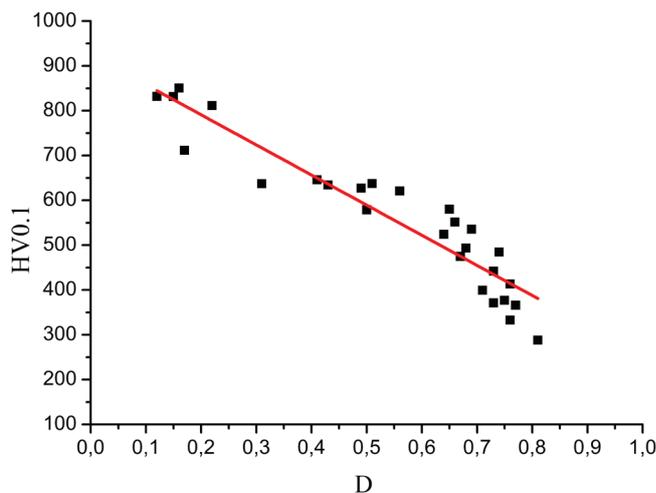


Рис. 9. Микротвердость единичных треков в зависимости от коэффициента перемешивания

Fig. 9. Microhardness of unit tracks versus the mixing coefficient

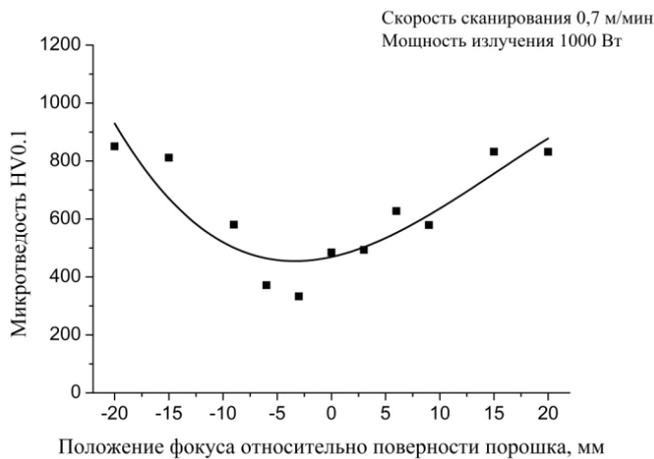


Рис. 10. Микротвердость единичных треков в зависимости от положения фокуса

Fig. 10. Microhardness of unit tracks versus the focus position

( $-20 \text{ мм} < \Delta f < +20 \text{ мм}$ ). Видно, что минимальная микротвердость достигается при  $\Delta f = -3 \text{ мм}$ , а затем симметрично возрастает.

### Выводы

Таким образом, проведено комплексное исследование влияния параметров лазерной наплавки на микроструктуру и микротвердость формируемых единичных металлокерамических треков. Установлено, что большое влияние на форму и механические характеристики оказывает режим фокусировки лазерного излучения относительно поверхности начального слоя порошковой смеси. Получено, что при использовании в качестве независимой переменной параметра  $P/\sqrt{V}$ , для режима кинжального проплавления ( $\Delta f = -3 \text{ мм}$ ) ширины треков  $w$  и глубины проплава  $Hm$  можно описать единими зависимостями. Получено, что наплавленная металлокерамическая структура обладает в 4...5 раза большим значением микротвердости 850,4 HV0.1 по сравнению с подложкой 178 HV0.1.

### Список литературы

1. 4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography / Y.C. Choong, S. Maleksaedi, H. Eng, J. Wei, P. Su // *Materials & Design*. – 2017. – N 126. – P. 219–225. – doi: 10.1016/j.matdes.2017.04.049.
2. Gan M., Wong C. Properties of selective laser melted spodumene glass-ceramic // *Journal of the Euro-*

pean Ceramic Society. – 2017. – Vol. 37 (13). – P. 4147–4154. – doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.060.

3. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms / D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // *International Materials Reviews*. – 2012. – Vol. 57, iss. 3. – P. 133–164. – doi: 10.1179/1743280411Y.0000000014.

4. Lu Q., Wong C. Additive manufacturing process monitoring and control by non-destructive testing techniques: challenges and in-process monitoring // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2018. – Vol. 13, iss. 2. – P. 39–48. – doi: 10.1080/17452759.2017.1351201.

5. Tribological and corrosion properties of Al-12Si produced by selective laser melting / K. Prashanth, B. Debalina, Z. Wang, P. Gostin, A. Gebert, M. Calin, J. Eckert // *Journal of Materials Research*. – 2014. – Vol. 29, iss. 17. – P. 2044–2054. – doi: 10.1557/jmr.2014.133.

6. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior – a comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting / F. Bartolomeu, M. Buciumeanu, E. Pinto, N. Alves, O. Carvalho, F.S. Silva, G. Miranda // *Additive Manufacturing*. – 2017. – N 16. – P. 81–89. – doi: 10.1016/j.addma.2017.05.007.

7. Simultaneous enhancements of strength and toughness in an Al-12Si alloy synthesized using selective laser melting / J. Suryawanshi, K. Prashanth, S. Scudino, J. Eckert, O. Prakash, U. Ramamurty // *Acta Materialia*. – 2016. – N 7/5. – P. 285–294. – doi: 10.1016/j.actamat.2016.06.009.

8. Nickel A.H., Barnett D.M., Prinz F.B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing // *Materials Science and Engineering: A*. – 2001. – N 317 (1–2). – P. 59–64. – doi: 10.1016/S0921-5093(01)01179-0.

9. Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling / G. Vastola, G. Zhang, Q.X. Pei, Y.W. Zhang // *Additive Manufacturing*. – 2016. – N 12. – P. 231–239. – doi: 10.1016/j.addma.2016.05.010.

10. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V / L. Thijs, F. Verhaeghe, T. Craeghs, J. Van Humbeeck, J.P. Kruth // *Acta Materialia*. – 2010. – Vol. 58. – P. 3303–3312. – doi: 10.1016/j.actamat.2010.02.004.

11. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts / P. Hanzl, M. Zetek, T. Baksa, T. Kroupa // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 1405–1413. – doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.510.

12. Multiple material additive manufacturing – part 1: a review / M. Vaezi, S. Chianrabutra, B. Mellor, S. Yang // *Virtual and Physical Prototyping*. – 2013. – Vol. 8. – P. 19–50. – doi: 10.1080/17452759.2013.778175.

13. Creation of heterogeneous materials on the basis of B<sub>4</sub>C and Ni powders by the method of cold spraying with subsequent layer-by-layer laser treatment / V.M. Fomin, A.A. Golyshev, V.F. Kosarev, A.G. Malikov, A.M. Orishich, N.S. Ryashin, A.A. Filippov, V.S. Shikalov // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2017. – Vol. 58, iss. 5. – P. 947–955. – doi: 10.1134/S0021894417050224.

14. *Miracle D.B.* Metal matrix composites from science to technological significance // *Composites Science and Technology*. – 2005. – Vol. 65, N 15–16. – P. 2526–2540. – doi: 10.1016/j.compscitech.2005.05.027.

15. An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings / J. Rodriguez, A. Martin, R. Fernandez, J.E. Fernandez // *Wear*. – 2003. – N 255 (7–12). – P. 950–955. – doi: 10.1016/S0043-1648(03)00162-5.

16. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings / D. Chaliampalias, G. Vourlias, E. Pavlidou, S. Skolianos, K. Chrissafis, G. Stergioudis // *Applied Surface Science*. – 2009. – Vol. 255, iss. 6. – P. 3605–3612. – doi: 10.1016/j.apsusc.2008.10.006.

17. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings / C. Guo, J. Zhou, J. Chen, J. Zhao, Y. Yu, H. Zhou // *Wear*. – 2011. – Vol. 270, iss. 7–8. – P. 492–498. – doi: 10.1016/j.wear.2011.01.003.

18. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi–WC coatings on stainless steel / M. Tobar, C. Alvarez, J. Amado, G. Rodriguez, A. Yanez //

*Surface and Coatings Technology*. – 2006. – N 200. – P. 6313–6317. – doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.093.

19. Dry reciprocating sliding friction and wear response of WC-Ni cemented carbides / K. Bonny, P. Baets, J. Vleugels, S. Huang, B. Lauwers // *Tribology Letters*. – 2008. – Vol. 31, iss. 3. – P. 199–209. – doi: 10.1007/s11249-008-9352-z.

20. Experimental investigation of the oxygen-assisted laser cutting of low-carbon steel by the fiber and CO<sub>2</sub> lasers at minimal roughness / A.M. Orishich, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, V.B. Shulyat'ev // *Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 44, iss. 10. – P. 970–974. – doi: 10.1117/12.2037477.

21. Experimental comparison of laser energy losses in high-quality laser-oxygen cutting of low-carbon steel using radiation from fibre and CO<sub>2</sub> lasers / A.M. Orishich, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, V.B. Shulyat'ev // *Quantum Electronics*. – 2015. – Vol. 45, iss. 9. – P. 873–878. – doi: 10.1070/QE2015v045n09ABEH015739.

22. High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO<sub>2</sub> lasers / A.M. Orishich, A.A. Golyshev, A.G. Malikov, V.B. Shulyat'ev // *Quantum Electronics*. – 2014. – Vol. 44, iss. 3. – P. 233–238. – doi: 10.1070/QE2014v-044n03ABEH015320.

23. Низкотемпературная плазма. Т. 18. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / О.П. Солоненко, А.П. Алхимов, В.В. Марусин, Х.М. Рахмиянов, А.М. Оришич, Р.А. Салимов, В.Г. Щукин, В.Ф. Косарев; отв. ред. М.Ф. Жуков, В.М. Фомин. – Новосибирск: Наука, 2000. – 425 с. – ISBN 5-02-031528-1.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Study of the Laser Radiation Focusing Modes Effect on Geometrical and Mechanical Properties of Metal-Ceramic Tracks

Alexander Golyshev<sup>1, 2, a, \*</sup>, Anatoly Orishich<sup>1, 2, b</sup>

<sup>1</sup> Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, 1 Pirogova street, Novosibirsk, 630090, Russian Federation

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4243-0602>, alexgol@itam.nsc.ru, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0551-0213>, laser@itam.nsc.ru

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received: 23 November 2018

Revised: 18 January 2019

Accepted: 29 January 2019

Available online: 15 March 2019

#### Keywords:

Laser cladding  
 Optimization  
 Metal ceramics  
 Microhardness  
 Scaling laws  
 Tungsten carbide

#### Funding

A part of the work related to the adjustment of the cladding optimization technique, improvement of the technology of production of high-quality samples and searching for generalized parameters has been supported by the grant of the Russian Scientific Foundation "Investigation of multilayer laser formation of functional gradient cermet structures including B<sub>4</sub>C, TiC and TiB<sub>2</sub>, using pulsed-periodic laser radiation" № 18-79-00052.

### ABSTRACT

**Introduction.** Additive technologies (AT) present the method to produce particles by means of layered build-up of materials with any geometry. This technology plays important role in the manufacture of functional articles or in the recovery of worn parts with high strength capacity. Metal-ceramic structures including tungsten carbide and nickel alloy are widely used in tribological practices to protect the components under high-intensity wear, such as cutting tools, drilling and mechanical processing, in mining industry. **The aim of the work** is to optimize the laser cladding of metal-ceramic single tracks to obtain a monolithic weld structure with maximum hardness. **The paper investigates** the effect of the laser radiation on geometrical and mechanical characteristics of the formed tracks using a powder mixture based on nickel alloys (NiCrBSi) 60 % by weight and tungsten carbide (WC) 40 % by weight. **Results and Discussion.** It is established that the shape and mechanical characteristics are strongly influenced by the mode of laser radiation focusing (the mode of keyhole penetration or the mode of thermal conductivity) relative to the surface of the initial layer of the powder mixture. It is also found that when the parameter  $P/\sqrt{V}$  is used as an independent variable, every factors of the track width  $w$  and penetration depth  $Hm$  can be described with consistent dependencies for the keyhole mode. It is demonstrated that in the clad track, in the thermal conductivity mode (the focusing mode  $f = \pm 20$ ), one observes the uniform distribution of ceramic particles featuring the maximal value of microhardness. It is found that the clad metal-ceramic structure has 4-5 times higher value of microhardness (850.4 HV0.1) than the substrate (178 HV0.1).

**For citation:** Golyshev A.A., Orishich A.M. Study of the laser radiation focusing modes effect on geometrical and mechanical properties of metal-ceramic tracks. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 82–92. doi: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-82-92. (In Russian).

#### \* Corresponding author

Golyshev Alexander A., Ph.D. (Physics and Mathematics), Researcher  
 Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS,  
 4/1 Institutskaya str.,  
 630090, Novosibirsk, Russian Federation  
 Tel.: 8 923-252-00-12, e-mail: alexgol@itam.nsc.ru

## References

1. Choong Y.C., Maleksaeedi S., Eng H., Wei J., Su P. 4D printing of high performance shape memory polymer using stereolithography. *Materials & Design*, 2017, no. 126, pp. 219–225. doi: 10.1016/j.matdes.2017.04.049.
2. Gan M., Wong C. Properties of selective laser melted spodumene glass-ceramic. *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, vol. 37, iss. 13, pp. 4147–4154. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.04.060.
3. Gu D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*, 2012, vol. 57, iss. 3, pp. 133–164. doi: 10.1179/1743280411Y.0000000014.
4. Lu Q., Wong C. Additive manufacturing process monitoring and control by non-destructive testing techniques: challenges and in-process monitoring. *Virtual and Physical Prototyping*, 2018, vol. 13, iss. 2, pp. 39–48. doi: 10.1080/17452759.2017.1351201.
5. Prashanth K., Debalina B., Wang Z., Gostin P., Gebert A., Calin M. Eckert J. Tribological and corrosion properties of Al-12Si produced by selective laser melting. *Journal of Materials Research*, 2014, vol. 29, iss. 17, pp. 2044–2054. doi: 10.1557/jmr.2014.133.
6. Bartolomeu F., Buciumeanu M., Pinto E., Alves N., Carvalho O., Silva F.S., Miranda G. 316L stainless steel mechanical and tribological behavior – a comparison between selective laser melting, hot pressing and conventional casting. *Additive Manufacturing*, 2017, no. 16, pp. 81–89. doi: 10.1016/j.addma.2017.05.007.
7. Suryawanshi J., Prashanth K., Scudino S., Eckert J., Prakash O., Ramamurty U. Simultaneous enhancements of strength and toughness in an Al-12Si alloy synthesized using selective laser melting. *Acta Materialia*, 2016, no. 7/5, pp. 285–294. doi: 10.1016/j.actamat.2016.06.009.
8. Nickel A.H., Barnett D.M., Prinz F.B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 2001, no. 317 (1–2), pp. 59–64. doi: 10.1016/S0921-5093(01)01179-0.
9. Vastola G., Zhang G., Pei Q.X., Zhang Y.W. Controlling of residual stress in additive manufacturing of Ti6Al4V by finite element modeling. *Additive Manufacturing*, 2016, no. 12, pp. 231–239. doi: 10.1016/j.addma.2016.05.010.
10. Thijs L., Verhaeghe F., Craeghs T., Humbeek J. Van, Kruth J.P. A study of the microstructural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. *Acta Materialia*, 2010, vol. 58, pp. 3303–3312. doi: 10.1016/j.actamat.2010.02.004.
11. Hanzl P., Zetek M., Baksa T., Kroupa T. The influence of processing parameters on the mechanical properties of SLM parts. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 100, pp. 1405–1413. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.510.
12. Vaezi M., Chianrabutra S., Mellor B., Yang S. Multiple material additive manufacturing – part 1: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 2013, vol. 8, pp. 19–50. doi: 10.1080/17452759.2013.778175.
13. Fomin V.M., Golyshev A.A., Kosarev V.F., Malikov A.G., Orishich A.M., Ryashin N.S., Filippov A.A., Shikalov V.S. Creation of heterogeneous materials on the basis of B4C and NI powders by the method of cold spraying with subsequent layer-by-layer laser treatment. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2017, vol. 58, iss. 5, pp. 947–955. doi: 10.1134/S0021894417050224.
14. Miracle D.B. Metal matrix composites from science to technological significance. *Composites Science and Technology*, 2005, vol. 65, no. 15–16, pp. 2526–2540. doi: 10.1016/j.compscitech.2005.05.027.
15. Rodriguez J., Martin A., Fernandez R., Fernandez J.E. An experimental study of the wear performance of NiCrBSi thermal spray coatings. *Wear*, 2003, no. 255 (7–12), pp. 950–955. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00162-5.
16. Chaliampalias D., Vourlias G., Pavlidou E., Skolianos S., Chrissafis K., Stergioudis G. Comparative examination of the microstructure and high temperature oxidation performance of NiCrBSi flame sprayed and pack cementation coatings. *Applied Surface Science*, 2009, vol. 255, iss. 6, pp. 3605–3612. doi: 10.1016/j.apsusc.2008.10.006.
17. Guo C., Zhou J., Chen J., Zhao J., Yu Y., Zhou H. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings. *Wear*, 2011, vol. 270, iss. 7–8, pp. 492–498. doi: 10.1016/j.wear.2011.01.003.
18. Tobar M., Alvarez C., Amado J., Rodriguez G., Yanez A. Morphology and characterization of laser clad composite NiCrBSi–WC coatings on stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, 2006, no. 200, pp. 6313–6317. doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.11.093.
19. Bonny K., Baets P., Vleugels J., Huang S., Lauwers B. Dry reciprocating sliding friction and wear response of WC-Ni cemented carbides. *Tribology Letters*, 2008, vol. 31, iss. 3, pp. 199–209. doi: 10.1007/s11249-008-9352-z.

20. Orishich A.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Shulyat'ev V.B. Experimental investigation of the oxygen-assisted laser cutting of low-carbon steel by the fiber and CO<sub>2</sub> lasers at minimal roughness. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, iss. 10, pp. 970–974. doi: 10.1117/12.2037477.

21. Orishich A.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Shulyat'ev V.B. Experimental comparison of laser energy losses in high-quality laser-oxygen cutting of low-carbon steel using radiation from fibre and CO<sub>2</sub> lasers. *Quantum Electronics*, 2015, vol. 45, iss. 9, pp. 873–878. doi: 10.1070/QE2015v045n09ABEH015739.

22. Orishich A.M., Golyshev A.A., Malikov A.G., Shulyat'ev V.B. High-quality laser cutting of stainless steel in inert gas atmosphere by ytterbium fibre and CO<sub>2</sub> lasers. *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, iss. 3, pp. 233–238. doi: 10.1070/QE2014v044n03ABEH015320.

23. Solonenko O.P., Alkhimov A.P., Marusin V.V., Rakhimyanov Kh.M., Orishich A.M., Salimov R.A., Shchukin V.G., Kosarev V.F. *Nizkotemperaturnaya plazma*. T. 18. *Vysokoenergeticheskie protsessy obrabotki materialov* [Temperature plasma. Vol. 18. High-energy processes of material treatment]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2000. 425 p. ISBN 5-02-031528-1.

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).