



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-3-271-278
EDN: UQGPAI
УДК 620.186

Научная статья / Research article

Пути снижения неметаллических включений в покрытиях, нанесенных лазерной наплавкой

А.В. Завитков , А.С. Локтев , А.Б. Люхтер , К.А. Фролов 

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, ВлГУ,
Владимир, Российская Федерация
✉ vip.zavitkov@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 16 апреля 2023 г.
Доработана: 17 июля 2023 г.
Принята к публикации: 25 июля 2023 г.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ).

Ключевые слова:

лазерная наплавка, неметаллические включения, КР-спектроскопия, газовая защита, мощность излучения

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования

Завитков А.В., Локтев А.С., Люхтер А.Б., Фролов К.А. Пути снижения неметаллических включений в покрытиях, нанесенных лазерной наплавкой // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 3. С. 271–278. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-271-278>

Аннотация. Приведены результаты экспериментальных исследований, основанных на анализе наплавленных покрытий и методов обработки, направленных на снижение количества неметаллических включений в процессе лазерной порошковой наплавки. Основная цель экспериментов заключалась в определении эффективности различных методов снижения неметаллических включений в наплавленных покрытиях. Источниками подобных дефектов зачастую являются окислы и шлак на обрабатываемой поверхности, а также гранулы порошкового материала, применяемого для нанесения износостойких покрытий. В качестве материала подложки использовалась коррозионноустойчивая жаропрочная сталь марки 08X18H10T (аналог AISI 321), из которого были изготовлены образцы с размерами 100x100x8 мм. Наплавка была выполнена с использованием металлического порошкового материала ПР — 08X17H8C6Г (аналог электрода ЦН-6Л) с фракционным составом 63–125 мкм, имеющего сферическую форму частиц и обладающего хорошей текучестью. Опытная лазерная наплавка производилась на лазерном роботизированном комплексе на базе иттербиевого волоконного лазера. Оценка неметаллических включений выполнялась путем металлографического анализа на травленных поперечных шлифах полученных наплавленных покрытий, а также методом КР-спектроскопии. Установлена качественная зависимость содержания дефектов, таких как газовые поры, в слое наплавленного покрытия от кристаллизации ванны расплава, формируемой при лазерной порошковой наплавке.



Methods for reducing non-metallic inclusions in coatings applied by laser surfacing

Alexey V. Zavitkov , Alexander S. Loktev , Alexander B. Lyukhter , Kirill A. Frolov 

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, *Vladimir, Russian Federation*

✉ vip.zavitkov@mail.ru

Article history

Received: April 16, 2023

Revised: July 17, 2023

Accepted: July 25, 2023

Acknowledgements

The work was carried out within the framework of the state task in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic FZUN-2020-0015, state task of the VLSU).

Keywords:

laser cladding, non-metallic inclusion, Raman spectroscopy, gas protection, laser power

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

For citation

Zavitkov AV, Loktev AS, Lyukhter AB, Frolov KA. Methods for reducing non-metallic inclusions in coatings applied by laser surfacing. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(3):271–278. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-3-271-278>

Введение

Лазерная порошковая наплавка является перспективным методом восстановления изношенных поверхностей, а также модификации поверхности путем придания недорогим маркам стали необходимых свойств на поверхности с повышенными характеристиками: износостойкости, жаростойкости, антифрикционными и коррозионной стойкости [1–3]. При лазерной наплавке на поверхность, содержащую неорганические соединения (оксиды, нитриды, загрязнения) может значительно понизиться качество наносимых покрытий [4]. Это связано с интенсивным перемешиванием в ванне расплава материала наплавки и материала подложки. За счет этого процесса неметаллические включения с поверхности подложки могут оказаться

внутри наплавляемого покрытия. Неметаллическими включениями являются окислы, шлак, в том числе газовые поры. Обозначенные дефекты образуются в наплавленном материале, также в результате наследования структуры гранул порошка.

Для обеспечения наплавки исключаящих неметаллические включения необходимо формирование условий, способствующих повышению длительности фазы ванны расплава, а также ее текучести [5–7]. В процессе застывания и кристаллизации ванны расплава неметаллические включения концентрируются по границе зерен, что приводит к снижению механических свойств получаемого материала. Эффективным методом выявления неметаллических включений является КР-спектроскопия [8–10].

Проблемы наличия неметаллических включений в слое наплавки были решены путем принятия комплекса мер, а именно: предварительная подготовка поверхности под наплавку (устранение поверхностного слоя окислов); увеличение погонной мощности лазерного излучения [11; 12]; улучшение эффективности газовой защиты.

1. Методы исследования

Для проведения экспериментальных работ по наплавке в работе был использован лазерный роботизированный комплекс наплавки на базе иттербиевого волоконного лазера, в состав которого входят 6-осевой промышленный робот манипулятор FANUC M710iC/50, одноколбовый порошковый питатель GTV PF 2/1 LC, экспериментальная оптическая лазерная головка с модулем подачи порошка с четырех сторон. Использование сопла, обеспечивающего заданный поток порошкового материала в зону наплавки, лазер IPG LC-3-K, было рассмотрено в [12].

В качестве наплавочного материала использовали металлический порошок эрозийно-стойких сплавов марки ПР-08Х17Н8С6Г (аналог электродов ЦН-6Л) с размерами частиц 63–125 мкм по ТУ 14-22-250-2013, предназначенный для высокопроизводительной и качественной наплавки уплотнительных поверхностей деталей арматуры энергетических установок [12; 13]. Данный порошковый материал имеет сферическую форму частиц и обладает хорошей текучестью. Химический состав порошка представлен в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Элементный состав порошкового материала ПР-08Х17Н8С6Г / Elemental composition of powder 08Kh17N8S6G

Fe	C	Cr	Co	Ni	Si	Mn	S	O ₂	P	N ₂
base	0,096	17,7	0,08	7,97	5,55	1,92	0,014	0,02	0,03	0,09

В качестве подложки использовали сталь марки 08Х18Н10Т (АISI 321). Наплавка выполнялась с предварительным подогревом подложки 350 °С в среде защитного газа аргона (Ar ВЧ 99,998 %).

Для оценки эффективности используемых методов уменьшения содержания неметаллических включений внутри наплавляемых покрытий были изготовлены лабораторные образцы

лазерной наплавки с размерами подложки 100×100×8 мм. Наплавка наносилась в один слой. На основе ранее проведенных исследований [12; 14] был выбран оптимальный технологический режим: мощность лазерного излучения — 2800 Вт, движение лазерной головки — 6 мм/сек, расход порошкового материала — 15 г/мин, шаг перекрытия наплавляемых дорожек — 2 мм, расход защитного газа 25 л/мин, диаметр пятна лазерного излучения — 5 мм, расход транспортирующего газа — 8 л/мин, расход защитного газа — 20 л/мин.

Перед проведением экспериментальных работ поверхность образцов подвергалась механической обработке с целью удаления поверхностного слоя, содержащего неорганические включения.

Эффективность влияния указанных методов уменьшения количества неметаллических включений внутри, а также на поверхности наплавляемых покрытий была оценена металлографическим анализом на травленых поперечных шлифах полученных образцов, а также методом КР-спектроскопии. Травление осуществлялось смесью азотной (HNO₃), соляной (HCl), серной (H₂SO₄) кислот, дистиллированной воды (H₂O) и хлорного железа (FeCl).

2. Результаты

При нанесении порошкового материала на предварительно подготовленную поверхность, а с использованием разработанной сопловой насадки в процессе лазерной наплавки удается снизить неметаллические включения в структуре наплавленного слоя.

Поперечные сечения наплавленного слоя, состоящего из единичных валиков, нанесенных с перекрытием, на предварительно подготовленную и не подготовленную поверхность представлены на рис. 1.

Для проведения КР-спектроскопии были подготовлены следующие образцы:

- области разрушения наплавленного образца, выполненные без предварительной обработки поверхности подложки (см. рис. 1, а);
- поверхности излома образца, выполненные с предварительной обработкой поверхности перед наплавкой (см. рис. 1, б);
- поверхности гранул наплавляемого порошкового материала (см. рис. 5).

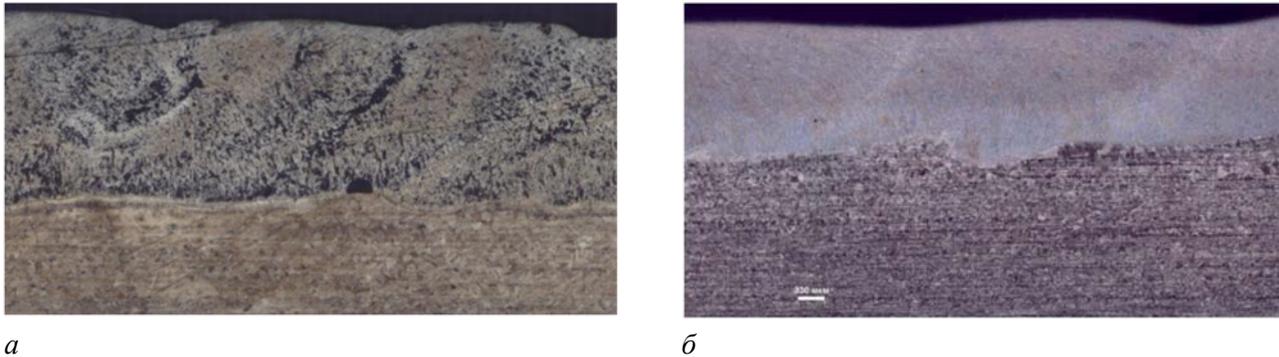


Рис. 1. Микрошлифы образцов наплавки:
a — на неподготовленную поверхность, с сопловой насадкой;
б — на механически обработанную поверхность, используя сопловую насадку

Figure 1. Micro-plates of surfacing samples:
a — on an unprepared surface, with a nozzle nozzle;
б — on a mechanically treated surface, using a nozzle nozzle

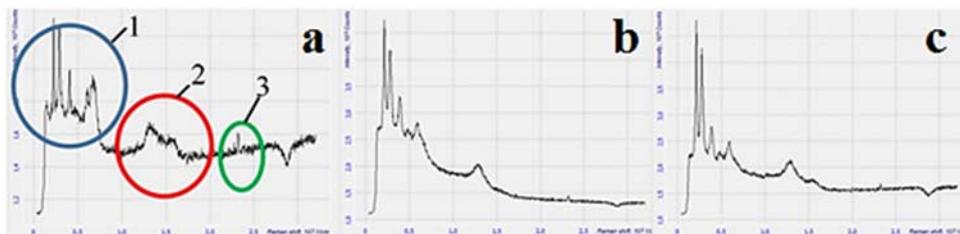


Рис. 2. КР-спектр поверхности разрушения образца для трех (*a, b, c*) случайных мест без предварительной обработки исследуемой поверхности:
1 — область с пиками, характерная для оксидов, нитридов;
2 — область с пиками, характерная для углерода; *3* — область с артефактами [15–18]

Figure 2. Raman spectrum of the fracture surface of the sample for three (*a, b, c*) random places without pretreatment of the surface under study:
1 — area with peaks characteristic of oxides, nitrides;
2 — area with peaks characteristic of carbon; *3* — area with artifacts [15–18]

Образование неметаллических включений характерно по границе зерна, по ним наблюдается разрушение структуры материала на поверхности излома, по которому произошло разрушение образца. Можно сделать предположение о попадании азота/кислорода в объем порошкового материала в процессе наплавки, либо это результат разрушения поверхностного слоя загрязнений на поверхности образца, наплавка на который осуществлялась без предварительной подготовки (механической очистки поверхности). В процессе наплавки, образования ванны расплава и кристаллизации материала неметаллические включения вытесняются на границу зерна, что мы наблюдаем на КР-спектре, представленном на рис. 2.

Далее были проанализированы результаты КР-спектров поверхности разрушения образца

без предварительной обработки (рис. 2). На передней части спектра (область 1), присутствуют выраженные пики оксидов, нитридов компонентов наплавочного материала, в средней части спектра, наблюдается два пика, характерных для углерода, в области 3 обозначены артефакты, вызванные засветкой люминесцентной лампы освещения.

На рис. 3 представлен КР-спектр поверхности, полученной после шлифовки плоскости разрушения образца наплавки, изготовленного с предварительно зачищенной поверхностью.

КР-спектр поверхности, полученной в результате шлифовки плоскости разрыва образца, говорит о значительном снижении концентрации неметаллических примесей, вероятно, они присутствуют в виде мелких включений в объеме зерна. Регистрируемые пики имеют нес-

колько большую интенсивность пиков, полученных с поверхности гранул порошкового материала. Вероятно, увеличение интенсивности регистрируемых пиков вызвано появлением дополнительных примесей, например, с необработанной поверхности подложки, либо кластеризацией неметаллических частиц в более крупные объекты, дающие более интенсивный отклик соответствующих линий на КР-спектре.

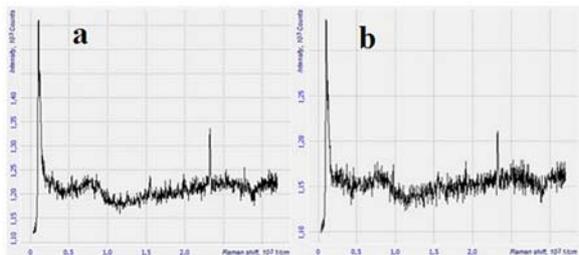


Рис. 3. КР-спектр области разрушения (поверхность зерна) на: *a, b* — исследуемом образце с предварительно зачищенной поверхностью перед наплавкой
Figure 3. Raman spectrum of the fracture region (grain surface) on: *a, b* — the test sample from the pre-cleaned surface before surfacing

Предположение о возможности образования окислов за счет наличия таковых в наплавляемом порошке отчасти может быть верно. На КР-спектрах, полученных с поверхности гранул используемого порошкового материала (см рис. 4), наблюдается наличие неметаллических материалов, наблюдаемых в аналогично представленных на рис. 2 областях. Наблюдаемые линии могут быть вызваны наличием как неметаллических примесей на поверхности, так и равномерно растворенных во всем объеме исследуемых гранул.

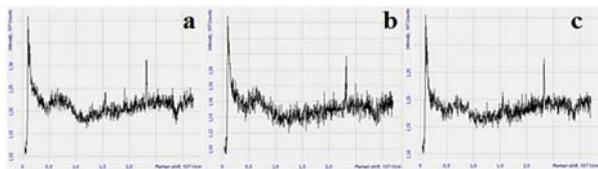


Рис. 4. КР-спектр поверхности гранул наплавляемого порошка для трех случайных мест: *a* — измерение № 1; *b* — измерение № 2; *c* — измерение № 3 /
Figure 4. Raman spectrum of the surface of the granules of the deposited powder for three random places: *a* — measurement No. 1; *b* — measurement No. 2; *c* — measurement No. 3

Анализ КР-спектров поверхностей гранул и поверхностей зерен разрушенного образца схожи, что свидетельствует о наследовании химического и фазового составов наплавленного материала от порошкового материала, что отмечалось в работе [8].

Структура используемого порошкового материала была исследована путем подготовки торцевого сечения гранул порошкового материала, залитых эпоксидной смолой (рис. 5). В исследуемых гранулах выявлено наличие пор (отмечены красным на рис. 5), что описано в литературе как распространенное явление, вызванное методом синтеза порошкового материала. Данные поры могут приводить к образованию пор в объеме наплавленного валика при условии недостаточного теплового вклада в процесс наплавки (когда полное расплавление гранул затруднено, наблюдается частичное оплавление) либо низкой скорости перемешивания оплавленного материала в ванне расплава, опять же ввиду недостаточного объема либо приложенной энергии.

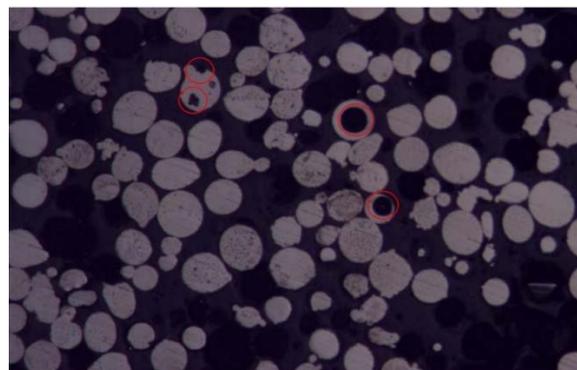


Рис. 5. Шлиф поверхности гранул наплавляемого порошкового материала
Figure 5. The cut of the surface of the granules of the deposited powder material

В результате сравнения КР-спектров сечения наплавленной дорожки на поверхность без предварительной подготовки выявлено значительное снижение интенсивности пиков комбинационного рассеяния характерных для оксидных и нитридных включений. Проведенное исследование носило качественный характер, показавший, что использование предварительной подготовкой поверхности (устранение поверхностного слоя окислов), позволило снизить

наличие неметаллических включений в ванне расплава, повысить эффективность взаимного перемешивания материала подложки и порошкового материала. Неметаллические включения, регистрируемые на КР-спектрах, аналогичны включениям, зарегистрированным с поверхности гранул используемого порошкового материала.

Для устранения пор и газовых карманов в структуре гранул порошкового материала (см. рис. 4) необходимо повысить энергоемкость процесса, чтобы снизить поверхностное натяжение компонентов ванны расплава, повысить общую ликвидность, что позволит эффективно устранить газовые пузырьки из расплавленных гранул порошкового материала в процессе конвективных движений в ванне расплава [9]. Энергоемкость процесса увеличилась за счет повышения мощности лазерного излучения, снижения потерь тепла во внешнюю среду из области наплавки и создания теплового газового экрана путем использования разработанной конструкции сопловой насадки (рис. 6).

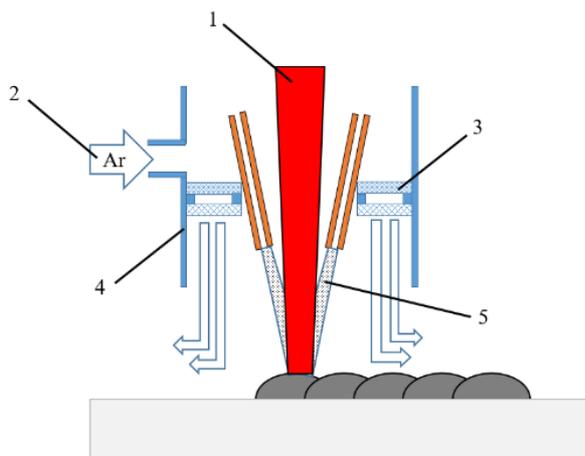


Рис. 6. Сопловая насадка: 1 — лазерное излучение; 2 — защитный газ (Ar); 3 — газовая линза; 4 — сопловая насадка; 5 — порошковый материал

Figure 6. Nozzle nozzle: 1 — laser radiation; 2 — protective gas (Ar); 3 — gas lens; 4 — nozzle nozzle; 5 — powder material

При использовании сопловой насадки в области воздействия лазерного излучения отраженное излучение разогревает стенки насадки, а при прохождении газового потока, содержащего гранулы порошкового материала, через область, ограниченную ее стенками, требуется

меньше энергии для их оплавления. Газовая линза, в состав которой входит металлическая сетка с размером ячейки 40 мкм, обеспечивает направленный поток защитного газа, в объеме которого распространяется порошковый материал, оплаваемый лазерным излучением, и ложится на поверхность образца. Направленная газовая струя приводит к более эффективному движению ванны расплава [19; 20].

Совокупность этих действий позволяет эффективно удалять неметаллические включения и поры, в том числе содержащиеся внутри гранул порошкового материала из объема ванны расплава на поверхности наплавляемого валика.

Заключение

Совокупность приведенных в работе способов позволяет эффективно удалять неметаллические включения и поры, в том числе содержащиеся внутри гранул порошкового материала из объема ванны расплава на поверхность наплавляемого валика, путем повышения погонной мощности лазерного излучения. С учетом применения комплекса мер были получены образцы лазерной порошковой наплавки. Количество неметаллических включений в образцах было ниже, чем на гранулах используемого порошкового материала.

Для получения покрытий с минимальным количеством неметаллических включений необходима не только качественная подготовка покрытия, но и обеспечение большей длительности существования ванны расплава, что было сделано в работе путем повышения мощности лазерного излучения, а также использования специальной сопловой насадки.

Список литературы / References

1. Santo L. Laser cladding of metals: a review. *International Journal of Surface Science and Engineering*. 2008;2(5):327–336. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2008.021345>
2. Vilar R. Laser cladding. *Journal of laser applications*. 1999;11(2):64–79. <https://doi.org/10.2351/1.521888>
3. Pogodaev LI, Ezhov YE. Improving the durability of operating devices of technical fleet vessels using wear-resistant facings. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2014;43(6):528–532. <https://doi.org/10.3103/S1052618814060077>

4. Byun JS, Shim J-H, Cho YW, Lee DN. Show more Non-metallic inclusion and intragranular nucleation of ferrite in Ti-killed C-Mn steel. *Acta Materialia*. 2003;51(6):1593–1606. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(02\)00560-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(02)00560-8)
5. Picasso M, Rappaz M. Laser-powder-material interactions in the laser cladding process. *Journal de Physique IV*. 1994;4(C4):C4-27–C4-33. <https://doi.org/10.1051/jp4:1994404>
6. Goodarzi DM, Pekkarinen J, Salminen A. Effect of process parameters in laser cladding on substrate melted areas and the substrate melted shape. *Journal of Laser Applications*. 2015;27(S2):S29201. <https://doi.org/10.2351/1.4906376>
7. Gots AN, Gusev DS, Lukhter AB, Zavitkov AV. Selection of rational modes of laser powder cladding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Sevastopol: IOP Publishing Ltd. 2020; 971(2):022093. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/2/022093>
8. Sklyar MO, Turichin GA, Klimova-Korsmik OG, Zotov OG, Topalov IK. Microstructure of 316L stainless steel components produced by direct laser deposition. *Steel in Translation*. 2016;46(12):883–887. <https://doi.org/10.3103/S096709121612010X>
9. Marin E, Zanocco M, Boschetto F, Santini M, Zhu Z, Adachi T, Ohgitani E, et al. Silicon nitride laser cladding: A feasible technique to improve the biological response of zirconia. *Materials & Design*. 2020;191(3):108649. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108649>
10. Xin B, Yu Y, Zhou J, Zhou J, Wang L, Ren Sh, Li Z. Effect of silver vanadate on the lubricating properties of NiCrAlY laser cladding coating at elevated temperatures. *Surface and Coatings Technology*. 2016; 307:136–145. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.08.063>
11. Aucott L, Dong H, Mirihanage W, et al. Revealing internal flow behaviour in arc welding and additive manufacturing of metals. *Nature communications*. 2018;9(1):5414. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07900-9>
12. Lyukhter AB, Frolov KA, Kochuev DA, Zavitkov AV, Gusev DS. Distortion of AISI 1020 steel substrate in the process of laser cladding of E-300 powder material. *Journal of Physics: Conference Series, Volume 2077, 10th International Conference “Beam Technologies and Laser Applications” (BTLA 2021) 20-22 September 2021, St. Petersburg, Russia*. 2021; 2077(1):012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2077/1/012004>
13. Гоц А.Н., Люхтер А.Б., Гусев Д.С., Завитков А.В. Выбор режимов лазерной наплавки порошка ПР-08Х17Н8С6Г // Черные металлы. 2020. № 11. С. 46–51. <https://doi.org/10.17580/chm.2020.11.07>
14. Gots AN, Lyukhter AB, Gusev DS, Zavitkov AV. Selection of modes for laser cladding of PR-08Kh17N8S6G powder. *Chernye metally [Ferrous Metals journal]*. 2020;11:46–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2020.11.07>
15. Mansour H, Letifi E, Bargougui R, De Almeida-Didry S, Negulescu B, Autret C, Gadri A, Ammar S. Structural, optical, magnetic and electrical properties of hematite (α -Fe₂O₃) nanoparticles synthesized by two methods: polyol and precipitation. *Applied Physics A*. 2017;123(12):787. <https://doi.org/10.1007/s00339-017-1408-1>
16. Ma J, Teo J, Mei L, Zheng W. Porous platelike hematite mesocrystals: synthesis, catalytic and gas-sensing applications. *Journal of Materials Chemistry*. 2012;22(23):11694–11700. <https://doi.org/10.1039/C2JM30216K>
17. Boumaza S, Boudjema A, Omeiri S, Bouarab R, Bouguelia A, Trari M. Physical and photo electrochemical characterizations of hematite α -Fe₂O₃: Application to photocatalytic oxygen evolution. *Solar Energy*. 2010;84(4):715–721.
18. Frolov KA, Voznesenskaya A, Gusev DS, Kochuev D, Lyukhter A, Zavitkov AV. Monitoring of alloying components burnout during laser powder cladding by laser-induced breakdown spectroscopy. *2022 International Conference Laser Optics (ICLO)*. Saint Petersburg, Russian Federation. 2022:01-01. <https://doi.org/10.1109/ICLO54117.2022.9839864>
19. Lyukhter AB, Palkin P, Zavitkov AV, Kononov DM, Kireev AV. Dependence of the structure and characteristics of a Russian alternative for AISI 304 stainless steel powder on the parameters of their laser cladding on substrates from low-carbon and structural steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing*. 2019;681(1):012028. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/681/1/012028>
20. Gotz AN, Gusev DS, Guskov VF, Zavitkov AV, Lukhter A B, Prokoshev VG, Rummyantsev IV. The effect of laser cladding modes on the geometrical parameters and adhesion strength of the deposited layer on a steel substrate 08Kh18N10T of corrosion-resistant powder 08Kh17N8S6G. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;896(1):012129. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012129>

Сведения об авторах

Завитков Алексей Викторович, ассистент кафедры тепловых двигателей и энергетических установок, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-4323-5398; E-mail: vip.zavitkov@mail.ru

Локтев Александр Сергеевич, аспирант кафедры технологий машиностроения, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0009-0004-5978-2219; E-mail: sloktev15@gmail.com

Люхтер Александр Борисович, кандидат технических наук, директор научно-образовательного центра внедрения лазерных технологий, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0003-1523-0637; E-mail: 3699137@mail.ru

Фролов Кирилл Андреевич, аспирант кафедры функционального анализа и его приложения института прикладной математики, физики и информатики, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация; ORCID: 0000-0001-8691-8151; E-mail: golegoga33rus@gmail.com

About the authors

Alexey V. Zavitkov, Assistant lecturer of the Department of Thermal Engines and Power Plants, Institute of Mechanical Engineering and Automobile Transport, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4323-5398; E-mail: vip.zavitkov@mail.ru

Alexander S. Loktev, Postgraduate student of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Institute of Mechanical Engineering and Automobile Transport, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-5978-2219; E-mail: sloktev15@gmail.com

Alexander B. Lyukhter, Candidate of Technical Sciences, Director of the Research and Educational Center for Introduction of Laser Technologies, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1523-0637; E-mail: 3699137@mail.ru

Kirill A. Frolov, Postgraduate student of the Department of Functional Analysis and Its Applications, Institute of Applied Mathematics, Physics and Informatics, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8691-8151; E-mail: golegoga33rus@gmail.com