

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.793 + 621.373.826 : 621.78

DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_17

*И. А. Антошин, С. И. Ярьсько***ЛАЗЕРНАЯ ПОСТОБРАБОТКА КЕРАМИЧЕСКИХ И КАРБИДОВОЛЬФРАМОВЫХ HVOF-ПОКРЫТИЙ***

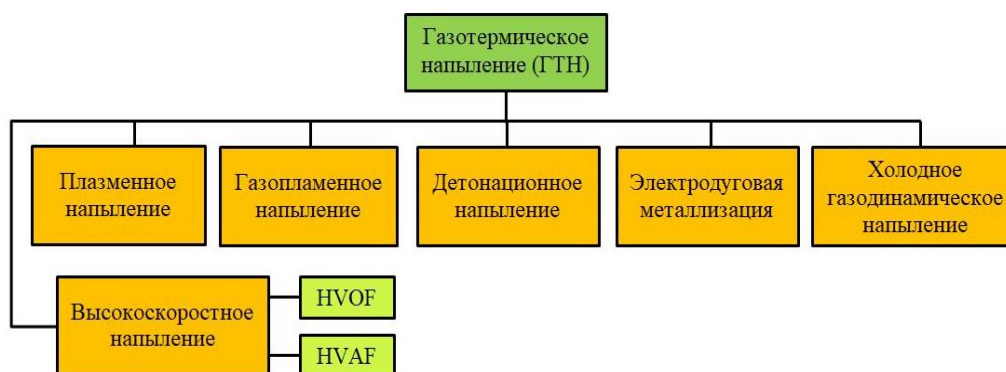
Аннотация. Проведен анализ современного состояния исследований в области лазерной постобработки керамических и карбидовольфрамовых покрытий, наносимых с помощью технологий газотермического напыления (ГТН). Показано, что наиболее целесообразна лазерная обработка с оплавлением поверхности. Лазерный переплав позволяет получать покрытия с улучшенными прочностными свойствами. Установлено значительное изменение структуры газотермических покрытий (ГТП), снижение дисперсности и порообразования, повышение их эксплуатационных характеристик, таких как износостойкость, твердость, коррозионная стойкость. Указаны причины наблюдаемых изменений структурных и прочностных характеристик покрытий после лазерной термообработки (ЛТО) HVOF-покрытий с переплавом, даны рекомендации по выбору режимов обработки.

Ключевые слова: лазерная обработка (ЛО), газотермическое покрытие, износостойкость, микротвердость, структура, эксплуатационные характеристики.

Для цитирования: Антошин, И. А. Лазерная постобработка керамических и карбидовольфрамовых HVOF-покрытий / И. А. Антошин, С. И. Ярьсько // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 1. – С. 17–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_17.

Введение

Технологии ГТН получили широкое распространение в области машиностроения. Данный вид технологии применяется как для защиты изделий или придания им более высоких эксплуатационных свойств, так и для восстановления рабочих поверхностей деталей и узлов [1]. К методам ГТН, как известно [2, 3], относятся высокоскоростные методы напыления HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) и HVAF (High Velocity Air Fuel), которые наиболее актуальны для нанесения порошковых ГТП, а также газопламенное и газоплазменное, детонационное и холодное газодинамическое напыление, электродуговая металлизация (рис. 1).

**Рис. 1. Методы ГТН**

* Статья рекомендована к публикации оргкомитетом по результатам 16-й юбилейной Международной научно-практической конференции «Перспективы развития локомотиво-, вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава».

Напыление газотермических покрытий на металлическую подложку рабочего узла машины или конструкции оказывает значительное влияние на ресурс работы этого узла. Керамические покрытия обладают рядом существенных технологических достоинств, к которым прежде всего можно отнести хорошую адгезионную прочность и коррозионную стойкость. К наиболее распространенным композициям относятся порошки на основе $ZrO_2-7\% Y_2O_3$, Cr_3C_2-NiCr , Al_2O_3 . Порошковые покрытия на основе карбида вольфрама WC показывают высокую твердость и износостойкость. К наиболее распространенным композициям относятся порошки на основе WC-Co, WC-CoCr, WC-(W,Cr)₂C-Ni [4].

Несмотря на значительные преимущества напыляемых покрытий, такие как не превышающая 2–5 % пористость, хорошая адгезия между основой и покрытием, покрытия, созданные высокоскоростными методами напыления, обладают рядом недостатков. Основным из них, хотя и редко упоминаемым, является образование оксидных пленок в процессе напыления порошковых материалов. За счет кислородосодержащей атмосферы пламени на частицах порошка затруднено восстановление оксидов железа, никеля, кобальта, вольфрама, а на поверхности подложки совершенно невозможно. Окисленные поверхности напыляемых гранул порошка препятствуют образованию металлургической связи между подложкой и гранулами порошка, между ними образуется тонкая оксидная пленка.

Для повышения эксплуатационных характеристик газотермических покрытий целесообразно применять дополнительную термическую обработку нанесенного покрытия [5–9], в том числе и лазерную постобработку. Покрытия, полученные таким образом, могут значительно продлить срок службы деталей машин, для которых он ограничен.

К числу приоритетных работ в этом направлении относятся работы по уменьшению пористости покрытий, увеличению адгезии покрытия и материала подложки, а также по изучению влияния лазерного излучения (ЛИ) на свойства и структуру покрытий. Разработка способов повышения антифрикционных и защитных свойств деталей машин и рекомендаций по применению дополнительной ЛТО таких покрытий является перспективным направлением исследований. К настоящему времени в этой области достигнуты определенные успехи.

Цель работы – анализ современного состояния исследований в области лазерной постобработки ГТП, получаемых методами ГТН, основных свойств таких покрытий и перспектив их применения.

Лазерное оборудование для обработки ГТП

Для проведения дополнительной ЛТО с целью увеличения основных эксплуатационных свойств покрытий преимущественно используются CO₂-лазеры с фиксированной длиной волны $\lambda = 10,6$ мкм [10, 11], имеется опыт применения CO₂-лазера с перестраиваемой длиной волны $\lambda = 9-12$ мкм [12]. При использовании данных типов лазеров актуальны режимы постобработки покрытий при мощности излучения до 3,8 кВт и скоростях сканирования до 10 мм/с. Для ЛТО HVOF-покрытий известно применение мощных непрерывных диодных лазеров с максимальной мощностью до 1,5 кВт [13, 14]. При ЛТО керамических покрытий нашли применение импульсные [15] и непрерывные [16] Nd:YAG-лазеры, мощность которых варьируется в пределах 0,4–3,0 кВт, скорость сканирования – от 0,5 до 5 м/мин, энергия в импульсе – до 55 Дж.

Влияние лазерной постобработки на основные эксплуатационные свойства ГТП

В настоящее время накоплен значительный опыт по лазерной модификации керамических покрытий на основе $ZrO_2-7\% Y_2O_3$, Cr_3C_2-NiCr , Al_2O_3 , покрытий системы Ni-Cr-B-Si, а также покрытий на основе WC, нанесенных с помощью технологий газотермического напыления. Лазерная модификация ГТП при использовании различных типов лазеров, режимов обработки и методов нанесения покрытий способна оказывать положительное влияние на их основные эксплуатационные свойства, а именно: микроструктуру, коррозионную стойкость, микротвердость, износостойкость, коэффициент трения, остаточные напряжения и некоторые другие.

Изменение структуры [13, 15–18]. Использование Nd:YAG-лазера при обработке керамических покрытий при мощности лазерного излучения 0,4–3,0 кВт обеспечивает более высокую плотность покрытий, снижает дисперсность их структуры, в этом случае устраняются такие недостатки, как высокая степень порообразования, количество пор снижается с 14,3 % до 2,5 % [15, 16]. ЛО керамических покрытий (Al_2O_3 , ПН 85-Ю-15) с использованием CO₂-лазера также приводит к уменьшению порообразования примерно в 1,5 раза (рис. 2) [17].

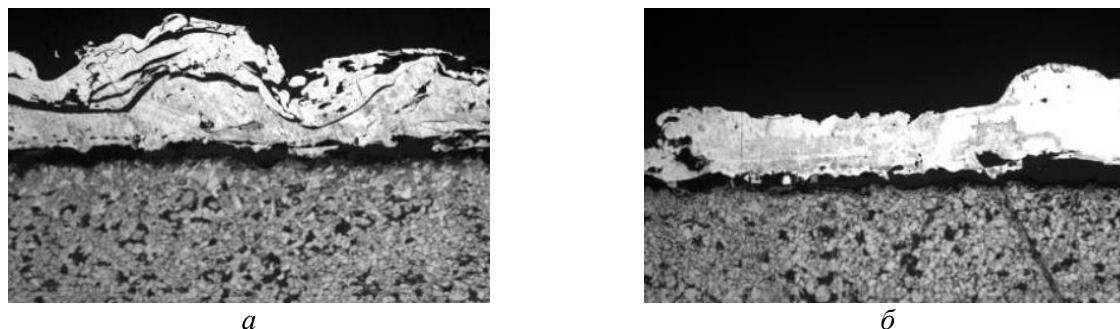


Рис. 2. Изменение структуры плазменного покрытия на основе сплава ПН 85-Ю-15 [17]:
a – покрытие в исходном состоянии; *б* – покрытие после ЛО

Эффект уменьшения пористости наблюдается при ЛО покрытия на основе карбида вольфрама [13]. Покрытие, нанесенное на цилиндрическую поверхность и обработанное ЛИ со скоростью (1,5 об/с) и мощностью 600–800 Вт, становится более плотным (рис. 3, *в*), подобный результат наблюдался и в работе [18], где говорится о практически нулевой пористости после лазерного переплава.

Уменьшение скорости сканирования, как и увеличение мощности ЛИ, приводит к грубой морфологии покрытия, что связано с попаданием окружающей среды (воздуха/частиц газа) в повторно расплавленный материал покрытия во время лазерной постобработки, в результате чего внутри покрытия образуются крупные газовые полости (рис. 3, *б*). Подобные изменения в микроструктуре покрытия наблюдаются за счет повторного быстрого нагрева и переплава материала с последующим быстрым охлаждением.

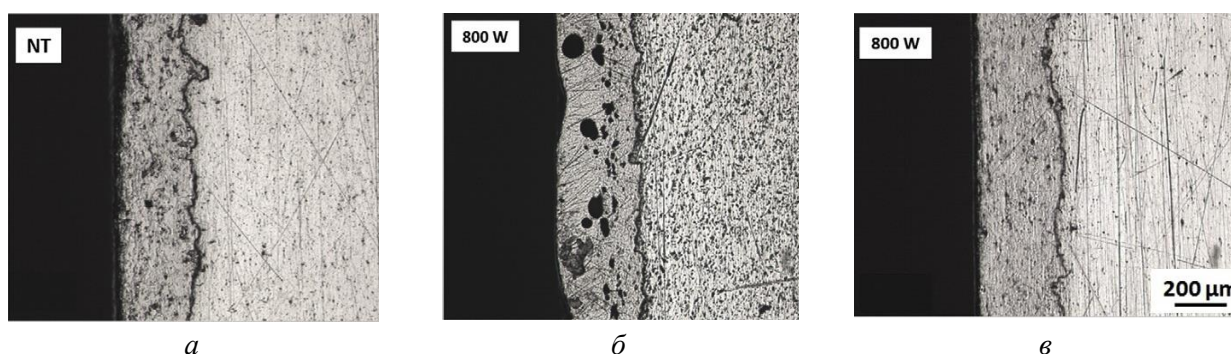


Рис. 3. Поперечный шлиф покрытия WC-Co/NiCr на подложке из алюминиевого сплава АА 6082 Т6 [13]:
a – без ЛО; *б, в* – после ЛО (скорость сканирования: *б* – 0,3 об/с; *в* – 1,5 об/с)

Коррозионная стойкость [19–22]. Лазерная постобработка покрытий вносит существенные изменения в их коррозионные свойства. На поведение покрытий в агрессивных средах оказывает влияние множество факторов, к ним относятся химический состав, микроструктура, наличие дефектов (пористость и включения) в покрытии [19, 21]. Коррозионный потенциал определяется фазовой структурой покрытия и окружающей его агрессивной средой. Уменьшение размера и количества пор, улучшение адгезии поверхности раздела являются важными мерами для предотвращения полного разрушения покрытия [20].

Для HVOF-покрытия WC-24%Cr₃C₂-6%Ni на подложке из сплава Inconel 718 [20] после лазерной постобработки потенциал разомкнутой цепи в результате испытаний в 3,5 %-ном растворе NaCl сдвигается в положительную сторону, т.е. покрытие после ЛО, имея более плотную структуру, эффективно защищает материал подложки от коррозии. Согласно данным потенциодинамической поляризации плотность тока коррозии для покрытия после лазерной постобработки меньше и более стабильна, что позволяет говорить о повышении стойкости такого покрытия к поверхностной коррозии.

Для покрытия на основе композиции Inconel 625 + 12 % WC потенциодинамические испытания в 0,5М растворе NaCl показывают, что коррозионная стойкость покрытия после лазерной постобработки выше, чем у необработанного покрытия. Это объясняется минимизацией количества пор [22]. Коррозионные

свойства HVOF-покрытий на основе порошка сплава T800 (CoMoCrSi) и WC до и после ЛО ($P = 450\text{--}550$ Вт, $V = 3$ мм/с) были оценены с помощью электрохимической импедансной спектроскопии в 0,5M растворе H_2SO_4 и иммерсионных испытаний в 3M растворе H_2SO_4 в течение 72 ч [20]. Коррозионная стойкость HVOF-покрытий в результате лазерной постобработки улучшена за счет устранения/уменьшения микроструктурных дефектов покрытий. Для покрытия T800 + 21 % WC удельное переходное сопротивление контакта покрытие/подложка после ЛО возросло с 3750 до 15100 Ом·см², что говорит о значительном повышении его коррозионной стойкости.

Микротвердость [13, 19, 20, 23–27]. Лазерная постобработка оказывает заметное влияние на микротвердость HVOF-покрытий. Увеличение твердости фиксируется для покрытий WC-10Co-4Cr, обработанных с помощью ЛИ как в импульсном [23], так и в непрерывном режиме [19, 23]. После непрерывной ЛО твердость покрытия равная 1780–1860 HV_{0,3}, на 45–47 % выше твердости необработанных покрытий [23], а для покрытий WC-24%Cr₃C₂-6%Ni – на 37,2 % [20]. При этом после непрерывной ЛО существенно возрастает однородность покрытия. При импульсной обработке наблюдается повышение количества микротрещин.

За счет повторного переплава поверхности примерно на 30 % возрастает микротвердость как HVOF-покрытия WC-10Co-4Cr на подложке из низкоуглеродистой стали [24], так и покрытия WC-Co/NiCr на подложке из алюминиевого сплава AA 6082 T6 [13]. При ЛО HVOF-покрытий WC-CrC-Ni на подложке из жаропрочного сплава Inconel 718 микротвердость покрытия увеличилась с 982,9 HV до 1277,0 HV [25], но неравномерно распределилась по глубине в отличие от результатов работ [23], что может быть связано с теплофизическими характеристиками материала покрытия и уменьшением зоны термического воздействия [25]. Между тем при увеличении скорости лазерного сканирования с 300 до 600 мм/мин микротвердость HVOF-покрытия снижается (рис. 4).

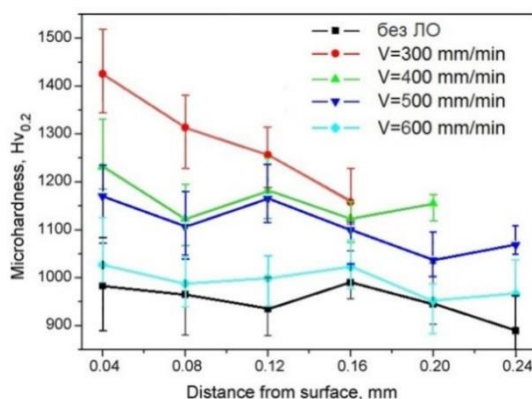


Рис. 4. Зависимость микротвердости от скорости сканирования [25]

ЛО покрытий из порошковых композиций промышленного производства (на основе Ni, Cr, Fe, порошков ПР-Х18Р9, ПН 85-Ю-15, самофлюсующихся сплавов ПГ-10Н-01 и РГ-12Н-1, Al_2O_3) позволяет получать более высокую микротвердость данных покрытий. Так, например, при ЛО с использованием непрерывного CO_2 -лазера (мощность излучения 400 Вт, скорость сканирования 6,5 мм/с) в режиме без оплавления наблюдалось повышение микротвердости по глубине покрытия до HV 1400–1800 при исходной микротвердости HV 1100–1250 [26]. При лазерной постобработке покрытия Cr₃C₂-25%NiCr с помощью диодного лазера с длиной волны 807 нм при вариации мощности от 100 до 200 Вт и скорости сканирования от 2 до 8 мм/с удалось добиться повышения микротвердости покрытия до HV 1032 при исходной микротвердости HV 800 [27].

Износостойкость [13, 18, 25, 28–30]. С использованием ЛТО удается повысить износостойкость покрытий на основе карбида вольфрама в определенных пределах в зависимости от режимов обработки. После постобработки с использованием CO_2 -лазера при трибоиспытаниях зафиксирован рост износостойкости HVOF-покрытий WC-Co/NiCr примерно на 30 % [13]. Оценка фрикционных свойств была выполнена с помощью линейного трибометра. Лазерная обработка ($P = 400$ Вт, $V = 400$ мм/мин) HVOF-покрытия WC-CrC-Ni на подложке из сплава Inconel 718 [28] после трибоиспытаний приводит к уменьшению коэффициента трения и глубины износа с 52 мкм для сплава Inconel 718 до 11 мкм для покрытия после ЛО (рис. 5).

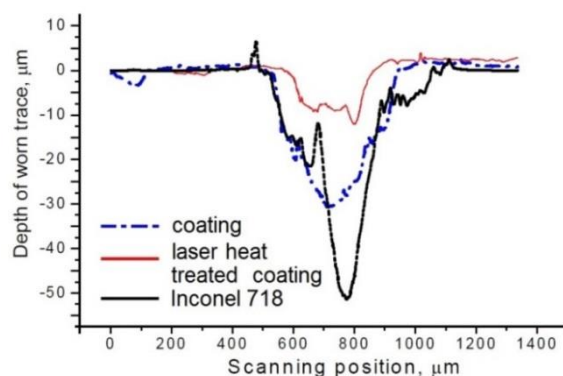


Рис. 5. Профиль трека износа [28]

Снижение коэффициента трения HVOF-покрытия WC-10Co-4Cr наблюдается и при использовании непрерывного волоконного лазера [29]. Здесь удалось добиться снижения износа на 10–20 % в условиях трения скольжения по схеме «диск – палец» при нагрузке 200 Н. В работе [30] было установлено большее снижение коэффициента трения для WC-10Co-4Cr HVOF-покрытия после лазерной постобработки ($P = 400$ Вт; $V = 10$ мм/с) с величины 0,44 до значения 0,11 при подобной схеме испытания. Повышению износостойкости покрытия способствовало образование фаз W_2C и Co_3W_3C .

Значительное увеличение износостойкости покрытий после лазерной постобработки, как и для покрытий на основе карбида вольфрама, наблюдается для керамических покрытий. Трибологические испытания по схеме «штифт – диск» без смазки показывают увеличение износостойкости керамического покрытия на основе ZrO_2 в 4–5 раз (рис. 6).

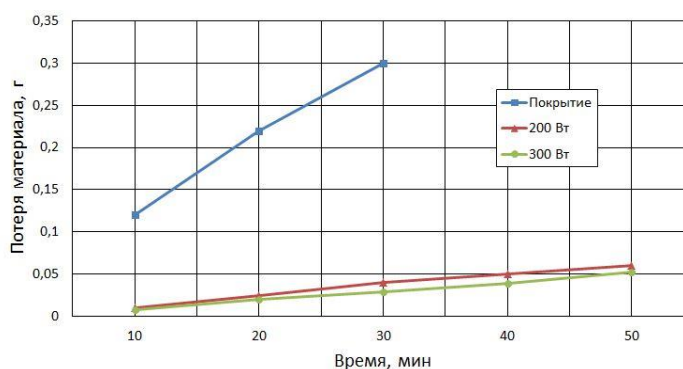


Рис. 6. Изменение износостойкости керамического покрытия [15]

Важно отметить, что повышение микротвердости рассматриваемых покрытий и уменьшение порообразования обуславливают рост их износостойкости.

Выводы

Анализ исследований в области лазерной постобработки ГТП свидетельствует о перспективности применения данного метода для повышения эксплуатационных характеристик функциональных покрытий. Это подтверждают следующие результаты:

- наиболее целесообразна ЛО покрытий с оплавлением поверхности. Лазерный переплав позволяет получать структуры с улучшенными прочностными свойствами. Однако при ЛО покрытий следует избегать чрезмерного перегрева покрытия, поскольку такая обработка может вызвать повышенную дефектность и последующее разрушение покрытия;
- для ГТП предпочтительнее применять непрерывную ЛО, в этом случае достигается более равномерное распределение физико-механических свойств;
- ЛО покрытий позволяет уменьшить порообразование в 2–6 раз, увеличить адгезионную прочность покрытия и металлической основы, после лазерной постобработки микротвердость покрытий повышается на 20–50 %;
- увеличение микротвердости и снижение пористости имеют решающее значение для улучшения трибологических характеристик покрытий. Коэффициент трения снижается в среднем на 20–65 %, а ско-

рость износа – на 60 % и более. Повышению износостойкости покрытий способствуют структурно-фазовые изменения в зоне лазерного переплава;

– лазерная постобработка покрытий позволяет повысить их коррозионную стойкость более чем на 50 %. Улучшение коррозионной стойкости обусловлено гомогенизацией структуры, устранением дискретной точечной структуры, микротрещин и пористости.

Следует также отметить, что большое количество работ, опубликованных за последние годы в данной области исследования, свидетельствует о значительном росте интереса к теме лазерной модификации поверхности ГТП и перспективности данного способа модификации ГТП.

Список литературы

1 Газотермическое напыление : учебное пособие / Л. Х. Балдаев [и др.] ; под общ. ред. Л. Х. Балдаева. – Москва : Маркет ДС, 2007. – 344 с. – ISBN 978-5-7958-0146-9.

2 **Коробов, Ю. С.** Анализ свойств газотермических покрытий. Часть 1 : Основные методы и материалы газотермического напыления / Ю. С. Коробов, В. И. Панов, Н. М. Разиков. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2016. – 80 с. – ISBN 978-5-7996-1966-4.

3 **Kumar, R.** Thermal spray coating : a study / R. Kumar, S. Kumar // Int. J. Eng. Sci. Research Technol. – 2018. – Vol. 7 (3). – P. 610–617. – DOI 10.5281/ZENODO.1207004.

4 **Berger, L.–M.** Application of hardmetals as thermal spray coatings / L.–M. Berger // Int. J Refract. Hard Met. – 2015. – Vol. 49. – P. 350–364. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029.

5 **Prashar, G.** Influence of heat treatment on surface properties of HVOF deposited WC and Ni-based powder coatings : a review / G. Prashar, H. Vasudev, L. Thakur // Surf. Topogr. : Metrol. Prop. – 2021. – Vol. 9. – 043002. – DOI 10.1088/2051-672X/ac3a52.

6 **Ghadami, F.** Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post treatments : A critical review / F. Ghadami, A. Sabour Rouh Aghdam // Thin Solid Films. – 2019. – Vol. 678 (6). – P. 42–52. – DOI 10.1016/j.tsf.2019.02.019.

7 **Panziera, R. C.** Study of the effects of the laser remelting process on the microstructure and properties of the WC-10Co-4Cr coating sprayed by HVOF / R. C. Panziera, A. C. C. de Oliveira, M. Pereira, F. Ratszunei // J Braz. Soc. Mech. Sci. – 2020. – Vol. 42 (3). – P. 1–8. – DOI 10.1007/s40430-020-2201-1.

8 Diagnostic of laser remelting of HVOF sprayed Stellite coatings using an infrared camera / M. Vostřák, J. Tesař, Š. Houdková [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2017. – Vol. 318. – P. 360–364. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2016.12.118.

References

1 Gas thermal spraying : textbook / L. Kh. Baldaev [et al.] ; under general ed. L. Kh. Baldaev. – Moscow : Market DS, 2007. – 344 p. – ISBN 978-5-7958-0146-9.

2 **Korobov, Yu. S.** Analysis of the properties of gas-thermal coatings. Part 1 : Basic methods and materials of thermal spraying / Yu. S. Korobov, V. I. Panov, N. M. Razikov. – Ekaterinburg : Ural University Publishing House, 2016. – 80 p. – ISBN 978-5-7996-1966-4.

3 **Kumar, R.** Thermal spray coating : a study / R. Kumar, S. Kumar // Int. J. Eng. Sci. Research Technol. – 2018. – Vol. 7 (3). – P. 610–617. – DOI 10.5281/ZENODO.1207004.

4 **Berger, L.–M.** Application of hardmetals as thermal spray coatings / L.–M. Berger // Int. J Refract. Hard Met. – 2015. – Vol. 49. – P. 350–364. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2014.09.029.

5 **Prashar, G.** Influence of heat treatment on surface properties of HVOF deposited WC and Ni-based powder coatings : a review / G. Prashar, H. Vasudev, L. Thakur // Surf. Topogr. : Metrol. Prop. – 2021. – Vol. 9. – 043002. – DOI 10.1088/2051-672X/ac3a52.

6 **Ghadami, F.** Improvement of high velocity oxy-fuel spray coatings by thermal post treatments : A critical review / F. Ghadami, A. Sabour Rouh Aghdam // Thin Solid Films. – 2019. – Vol. 678 (6). – P. 42–52. – DOI 10.1016/j.tsf.2019.02.019.

7 **Panziera, R. C.** Study of the effects of the laser remelting process on the microstructure and properties of the WC-10Co-4Cr coating sprayed by HVOF / R. C. Panziera, A. C. C. de Oliveira, M. Pereira, F. Ratszunei // J Braz. Soc. Mech. Sci. – 2020. – Vol. 42 (3). – P. 1–8. – DOI 10.1007/s40430-020-2201-1.

8 Diagnostic of laser remelting of HVOF sprayed Stellite coatings using an infrared camera / M. Vostřák, J. Tesař, Š. Houdková [et. al.] // Surf. Coat. Technol. – 2017. – Vol. 318. – P. 360–364. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2016.12.118.

9 Особенности процесса лазерного оплавления газотермических покрытий / Л. Х. Балдаев, Д. З. Ишмухаметов, М. В. Ершов, В. С. Шарыгин // Трубопроводная арматура и оборудование (ТПА). – 2014. – № 6 (75). – С. 40–42. – ISSN 2218-9203.

10 **Triantafyllidis, D.** Crack-free densification of ceramics by laser surface treatment / D. Triantafyllidis, L. Li, F. H. Stott // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 201. – No. 6. – P. 3163–3173. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2006.06.032.

11 Effect of laser remelting of plasma sprayed coating of Cr-Ni-Re / P. Śliwński, M. S. Węglowski, J. Dworak [et al.] // *IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 1140. – No. 1. – P. 012054. – DOI 10.1088/1757-899X/1140/1/012054.

12 Laser Surface Modification of Ceramic Coating Materials / N. Al Harbi, K. Y Benyounis, L. Looney, J. Stokes // In book : *Encyclopedia of Smart Materials*. – Publisher : Elsevier, 2018. – DOI 10.1016/B978-0-12-803581-8.11386-4.

13 Improvement of thermally sprayed WC-Co/NiCr coatings by surface laser processing / A. Gisario, M. Puopolo, S. Venettacci [et al.] // *Int. J Refract. Hard Met.* – 2015. – Vol. 52. – P. 123–130. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2015.06.001.

14 **Gisario, A.** Laser surface modification (LSM) of thermally-sprayed Diamalloy 2002 coating / A. Gisario, M. Barletta, F. Veniali / *Opt. Laser Technol.* – 2012. – Vol. 44. – No. 6. – P. 1942–1958. – DOI 10.1016/j.optlastec.2012.02.011.

15 Wear behavior of laser-treated plasma-sprayed ZrO₂ coatings / Y. Fu, A. W. Batchelor, H. Xing, Y. Gu // *Wear*. – 1997. – Vol. 210. – No. 1–2. – P. 157–164. – DOI 10.1016/S0043-1648(97)00058-6.

16 Лазерная модификация плазменнанесенных покрытий / В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин, А. П. Грищенко [и др.] // *Вісник двигунобудування*. – 2009. – № 2. – С. 69–72.

17 Модифицирование газотермических покрытий воздействием излучения CO₂-лазера / А. А. Митрофанов, Е. А. Чашин, С. А. Балашова, А. Х. Харахашев // *Advanced Engineering Research*. – 2014. – Т. 14. – № 3 (78). – С. 103–110. – ISSN 2687-1653.

18 Tribological properties of plasma sprayed and laser re-melted 75/25 Cr₃C₂/NiCr coatings / J. Mateos, J. M. Cuetos, E. Fernandez, R. Vijande // *Tribol. Int.* – 2001. – Vol. 34. – P. 345–351. – DOI 10.1016/S0301-679X(01)00023-8.

9 Features of the process of laser melting of gas-thermal coatings / L. Kh. Baldaev, D. Z. Ishmukhametov, M. V. Ershov, V. S. Sharygin // *Pipe fittings and equipment (TPA)*. – 2014. – No. 6 (75). – P. 40–42. – ISSN 2218-9203.

10 **Triantafyllidis, D.** Crack-free densification of ceramics by laser surface treatment / D. Triantafyllidis, L. Li, F. H. Stott // *Surface and Coatings Technology*. – 2006. – Vol. 201. – No. 6. – P. 3163–3173. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2006.06.032.

11 Effect of laser remelting of plasma sprayed coating of Cr-Ni-Re / P. Śliwński, M. S. Węglowski, J. Dworak [et al.] // *IOP Conf. Ser. : Mater. Sci. Eng.* – 2021. – Vol. 1140. – No. 1. – P. 012054. – DOI 10.1088/1757-899X/1140/1/012054.

12 Laser Surface Modification of Ceramic Coating Materials / N. Al Harbi, K. Y Benyounis, L. Looney, J. Stokes // In book : *Encyclopedia of Smart Materials*. – Publisher : Elsevier, 2018. – DOI 10.1016/B978-0-12-803581-8.11386-4.

13 Improvement of thermally sprayed WC-Co/NiCr coatings by surface laser processing / A. Gisario, M. Puopolo, S. Venettacci [et al.] // *Int. J Refract. Hard Met.* – 2015. – Vol. 52. – P. 123–130. – DOI 10.1016/j.ijrmhm.2015.06.001.

14 **Gisario, A.** Laser surface modification (LSM) of thermally-sprayed Diamalloy 2002 coating / A. Gisario, M. Barletta, F. Veniali / *Opt. Laser Technol.* – 2012. – Vol. 44. – No. 6. – P. 1942–1958. – DOI 10.1016/j.optlastec.2012.02.011.

15 Wear behavior of laser-treated plasma-sprayed ZrO₂ coatings / Y. Fu, A. W. Batchelor, H. Xing, Y. Gu // *Wear*. – 1997, V. 210. – No. 1–2. – P. 157–164. – DOI 10.1016/S0043-1648(97)00058-6.

16 Laser modification of plasma-applied coatings / V. D. Shelyagin, V. Yu. Khaskin, A. P. Grishchenko [et al.] // *News of Dvigunobuduvannya*. – 2009. – No. 2. – P. 69–72.

17 Modification of gas-thermal coatings by exposure to CO₂ laser radiation / A. A. Mitrofanov, E. A. Chashchin, S. A. Balashova, A. Kh. Kharakhashev // *Advanced Engineering Research*. – 2014. – Vol. 14. – No. 3 (78). – P. 103–110. – ISSN 2687-1653.

18 Tribological properties of plasma sprayed and laser re-melted 75/25 Cr₃C₂/NiCr coatings / J. Mateos, J. M. Cuetos, E. Fernandez, R. Vijande // *Tribol. Int.* – 2001. – Vol. 34. – P. 345–351. – DOI 10.1016/S0301-679X(01)00023-8.

19 Characterization of microstructure and surface properties of hybrid coatings of WC–CoCr prepared by laser heat treatment and high velocity oxygen fuel spraying / S. H. Zhang, T. Y. Cho, J. H. Yoon [et al.] // *Materials Characterization*. – 2008. – Vol. 59 (10). – P. 1412–1418. – DOI 10.1016/j.matchar.2008.01.003.

20 Influence of CO₂ laser heat treatment on surface properties, electrochemical and tribological performance of HVOF sprayed WC–24%Cr₃C₂–6%Ni coating / S. H. Zhang, J. H. Yoon, M. X. Li [et al.] // *Mater. Chem. Phys.* – 2010. – Vol. 119 (3). – P. 458–464. – DOI 10.1016/j.matchemphys.2009.09.025.

21 Corrosion resistance of HVOF-sprayed coatings for hard chrome replacement / G. Bolelli, R. Giovanardi, L. Lusvardi, T. Manfredini // *Corros. Sci.* – 2006. – Vol. 48 (11). – P. 3375–3397. – DOI 10.1016/j.corsci.2006.03.001.

22 **Yilbas, B.** Effects of laser re-melting on the corrosion properties of HVOF coatings / B. Yilbas, I. Toor, F. Patel // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2013. – Vol. 22 (5). – P. 1505–1511. – DOI 10.1007/s11665-012-0428-4.

23 Characterisation of Laser Modified WC–CoCr Coatings / E. Chikarakara, M. Punset, J.A. Picas [et al.] // *AIP Conf. Proc.* – 2011. – Vol. 1353. – No. 1. – P. 1087–1092. – DOI 10.1063/1.3589661.

24 Surface modification of HVOF thermal sprayed WC–CoCr coatings by laser treatment / E. Chikarakara, S. Aqida, D. Brabazon [et al.] // *Int J Mater Form.* – 2010. – Vol. 3. – P. 801–804. – DOI 10.1007/s12289-010-0891-0.

25 Investigation on microstructure, surface properties and anti-wear performance of HVOF sprayed WC–CrC–Ni coatings modified by laser heat treatment / S.-H. Zhang, T.-Y. Cho, J.-H. Yoon [et al.] // *Mater. Sci. Eng. B.* – 2009. – Vol. 162. – No. 2. – P. 127–134. – DOI 10.1016/j.mseb.2009.03.017.

26 Ceramic surface modifications induced by pulsed laser treatment / E. Cappelli, S. Orlando, D. Sciti [et al.] // *Applied Surface Science.* – 2000. – Vol. 154. – P. 682–688. – DOI 10.1016/S0169-4332(99)00422-5.

27 Surface modification of Cr₃C₂–NiCr cermet coatings by direct diode laser / J. Morimoto, Y. Sasaki, S. Fukuhara [et al.] // *Vacuum.* – 2006. – Vol. 80 (11–12). – P. 1400–1405. – DOI 10.1016/j.vacuum.2006.01.070.

28 Wear and Corrosion Resistances of Inconel718, HVOF coating of WC-metal Powder and Laser Heat-treated coating / H. G. Chun, Y. K. Joo, J. H. Yoon [et al.] // *Appl. Mech. Mater.* – 2013. – Vol. 419. – P. 381–387. –

19 Characterization of microstructure and surface properties of hybrid coatings of WC–CoCr prepared by laser heat treatment and high velocity oxygen fuel spraying / S. H. Zhang, T. Y. Cho, J. H. Yoon [et al.] // *Materials Characterization*. – 2008. – Vol. 59 (10). – P. 1412–1418. – DOI 10.1016/j.matchar.2008.01.003.

20 Influence of CO₂ laser heat treatment on surface properties, electrochemical and tribological performance of HVOF sprayed WC–24%Cr₃C₂–6%Ni coating / S. H. Zhang, J. H. Yoon, M. X. Li [et al.] // *Mater. Chem. Phys.* – 2010. – Vol. 119 (3). – P. 458–464. – DOI 10.1016/j.matchemphys.2009.09.025.

21 Corrosion resistance of HVOF-sprayed coatings for hard chrome replacement / G. Bolelli, R. Giovanardi, L. Lusvardi, T. Manfredini // *Corros. Sci.* – 2006. – Vol. 48 (11). – P. 3375–3397. – DOI 10.1016/j.corsci.2006.03.001.

22 **Yilbas, B.** Effects of laser re-melting on the corrosion properties of HVOF coatings / B. Yilbas, I. Toor, F. Patel // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2013. – Vol. 22 (5). – P. 1505–1511. – DOI 10.1007/s11665-012-0428-4.

23 Characterisation of Laser Modified WC–CoCr Coatings / E. Chikarakara, M. Punset, J.A. Picas [et al.] // *AIP Conf. Proc.* – 2011. – Vol. 1353. – No. 1. – P. 1087–1092. – DOI 10.1063/1.3589661.

24 Surface modification of HVOF thermal sprayed WC–CoCr coatings by laser treatment / E. Chikarakara, S. Aqida, D. Brabazon [et al.] // *Int J Mater Form.* – 2010. – Vol. 3. – P. 801–804. – DOI 10.1007/s12289-010-0891-0.

25 Investigation on microstructure, surface properties and anti-wear performance of HVOF sprayed WC–CrC–Ni coatings modified by laser heat treatment / S.-H. Zhang, T.-Y. Cho, J.-H. Yoon [et al.] // *Mater. Sci. Eng. B.* – 2009. – Vol. 162. – No. 2. – P. 127–134. – DOI 10.1016/j.mseb.2009.03.017.

26 Ceramic surface modifications induced by pulsed laser treatment / E. Cappelli, S. Orlando, D. Sciti [et al.] // *Applied Surface Science.* – 2000. – Vol. 154. – P. 682–688. – DOI 10.1016/S0169-4332(99)00422-5.

27 Surface modification of Cr₃C₂–NiCr cermet coatings by direct diode laser / J. Morimoto, Y. Sasaki, S. Fukuhara [et al.] // *Vacuum.* – 2006. – Vol. 80 (11–12). – P. 1400–1405. – DOI 10.1016/j.vacuum.2006.01.070.

28 Wear and Corrosion Resistances of Inconel718, HVOF coating of WC-metal Powder and Laser Heat-treated coating / H. G. Chun, Y. K. Joo, J. H. Yoon [et al.] // *Appl. Mech. Mater.* – 2013. – Vol. 419. – P. 381–387. –

DOI 10.4028/www.scie-tific.net/AMM.419.381.

29 **Ярьско, С. И.** Лазерная непрерывная обработка газотермических покрытий WC-10Co-4Cr / С. И. Ярьско, И. А. Антошин // Pulsed Lasers and Laser Applications. Materials of the 16th International Conference AMPL–2023, 10–15 September, 2023. – Tomsk : STT Publishing House, 2023. – С. 56–61.

30 Laser Remelting of WC-CoCr Surface Coated by HVOF : Effect on the Tribological Properties and Energy Efficiency / R. De Medeiros Castro, E. Curi, L. F. Feltrim Inacio [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2021. – No. 427 (4). – 127841. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2021.127841.

Y. K. Joo, J. H. Yoon [et al.] // Appl. Mech. Mater. – 2013. – Vol. 419. – P. 381–387. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMM.419.381.

29 **Yaresko, S. I.** Continuous laser processing of gas-thermal coatings WC-10Co-4Cr / S. I. Yaresko, I. A. Antoshin // Pulsed Lasers and Laser Applications. Materials of the 16th International Conference AMPL–2023, 10–15 September, 2023. – Tomsk : STT Publishing House, 2023. – P. 56–61.

30 Laser Remelting of WC-CoCr Surface Coated by HVOF : Effect on the Tribological Properties and Energy Efficiency / R. De Medeiros Castro, E. Curi, L. F. Feltrim Inacio [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2021. – No. 427 (4). – 127841. – DOI 10.1016/j.surfcoat.2021.127841.

I. A. Antoshin, S. I. Yaresko

LASER POSTPROCESSING OF CERAMIC AND TUNGSTEN CARBIDE HVOF COATINGS

Abstract. The article analyzes the current state of research in the field of laser post-processing of ceramic and tungsten carbide coatings applied using thermal spraying (TS) technologies. It is shown that laser processing with surface melting is the most appropriate. Laser remelting makes it possible to obtain coatings with improved strength properties. It was found that the structure of thermal spray coatings (TSC) changed significantly, the dispersion and porosity decreased, and their performance characteristics, such as wear resistance, hardness, and corrosion resistance, increased. The reasons for the observed changes in the structural and strength characteristics of coatings after laser heat treatment (LHT) of HVOF coatings with remelting are indicated and recommendations for choosing processing modes are given.

Keywords: laser processing, thermal spray coating, wear resistance, microhardness, structure, performance characteristics.

For citation: Antoshin, I. A. Laser postprocessing of ceramic and tungsten carbide HVOF coatings / I. A. Antoshin, S. I. Yaresko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2025. – No. 1. – P. 17–25. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_1_17.

Сведения об авторах

Антошин Илья Александрович

Самарский государственный
технический университет (СГТУ),
аспирант,
e-mail: ilyaantoshin16@mail.ru

Ярьско Сергей Игоревич

Самарский филиал Физического
института им. П. Н. Лебедева РАН,
доктор технических наук, заведующий
лабораторией лазерно-индуцированных
процессов,
e-mail: yarsi54@gmail.com

Information about the authors

Antoshin Ilya Aleksandrovich

Samara State Technical University (SSTU),
Postgraduate Student,
e-mail: ilyaantoshin16@mail.ru

Yaresko Sergey Igorevich

Samara Branch of P. N. Lebedev Physical
Institute of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Head of the Laboratory of Laser-Induced
Processes (LLIP),
e-mail: yarsi54@gmail.com