



УДК 621.791.927.5

DOI 10.17073/0368-0797-2024-6-710-715



Оригинальная статья  
Original article

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СПОСОБОМ ГАЗОТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ

А. В. Колубаев<sup>✉</sup>, О. В. Сизова<sup>✉</sup>

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН (Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/4)

✉ ovs@ispms.tsc.ru

**Аннотация.** В работе исследовались микроструктура и механические свойства износостойких покрытий, нанесенных способом газотермического напыления с нагревом металла до жидкого состояния и последующим его распылением газовой струей. Газотермическое напыление в настоящее время все чаще выступает альтернативой различным методам наплавки из-за высоких затрат на расходные материалы, сложность обслуживания и обеспечения безопасности при выполнении ремонта. С помощью этого способа можно надежно решать разнообразные технологические задачи, к которым относятся: напыление износостойких, антифрикционных и коррозионностойких покрытий; алитирование напылением (повышение жаростойкости); наращивание размеров изделий; наплавка и пайка; устранение литейных дефектов; изготовление пресс-форм и др. Авторы исследовали триботехнические свойства штока виброгасителя железнодорожного вагона с нанесенными на рабочую поверхность упрочняющих поверхностных слоев способами газотермического напыления стали 40X13 и гальванического хромирования. Изучали строение и толщину покрытий, распределение микротвердости в зоне покрытия – подложка, а также особенности разрушения покрытий при одинаковых условиях испытаний. Критерием для сравнения износостойкости покрытий является время работы образцов до начала разрушения покрытия. Износ роликов определялся по изменению диаметра, а колодок – по глубине и ширине канавок, образовавшихся на их поверхности за время проведения эксперимента. Покрытие, нанесенное на шток виброгасителя распылением проволоки из стали 40X13, обладает высокой износостойкостью в условиях граничного трения со смазкой и способно быть альтернативой гальваническому хромоому покрытию. Высокая износостойкость покрытия позволяет рекомендовать его для восстановления размеров изношенных деталей и повышения долговечности новых, а также для замены специальных антифрикционных подшипниковых сплавов.

**Ключевые слова:** конструкционная сталь, размерный дефект, износостойкое покрытие, газотермическое напыление, триботехнические свойства, трение скольжения

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, номер темы FWRW 2021-0006.

**Для цитирования:** Колубаев А.В., Сизова О.В. Структура и свойства покрытий, полученных способом газотермического напыления. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2024;67(6):710–715. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-710-715>

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF COATINGS OBTAINED BY GAS-THERMAL SPRAYING

A. V. Kolubaev<sup>✉</sup>, O. V. Sizova<sup>✉</sup>

Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (2/4 Akademicheskii Ave., Tomsk 634055, Russian Federation)

✉ ovs@ispms.tsc.ru

**Abstract.** The authors investigated the microstructure and mechanical properties of wear-resistant coatings applied by the method of gas-thermal spraying with heating of the metal to a liquid state and its subsequent spraying with a gas jet. Nowadays, thermal spraying is increasingly an alternative to various methods of surfacing due to the high costs of consumables, the complexity of maintenance and safety during repairs. By this method, it is possible to reliably solve a variety of technological tasks, which include spraying of wear-resistant, antifricition and corrosion-resistant coatings; alitizing by spraying (increasing heat resistance); increasing the size of products; surfacing and soldering; elimination of casting defects; manufacture of molds, etc. The tribotechnical properties of the vibration damper rod of a railway carriage with reinforcing surface layers applied to the working surface by methods of gas-thermal spraying with 40Kh13 steel and galvanic chromium plating were investigated. Structure and thickness of the coatings, microhardness distribution in the coating-substrate zone, as well as the features of the coatings destruction under the same test conditions were studied. The criterion for comparing the coatings' wear resistance was the operating time of the samples before

the beginning of the coating destruction. Wear of the rollers was determined by the change in diameter, and wear of the pads – by the depth and width of the grooves formed on their surface during the experiment. The coating applied to the vibration damper rod by spraying 40Kh13 steel wire has high wear resistance in conditions of boundary friction with grease and can be an alternative to electroplated chrome coating. The high wear resistance of the coating makes it possible to recommend it for restoring the dimensions of worn parts and increasing the durability of new ones, as well as for replacing special anti-friction bearing alloys.

**Keywords:** structural steel, dimensional defect, wear-resistant coating, thermal spraying, tribotechnical properties, sliding friction

**Acknowledgements:** The work was performed within the framework of the state assignment of the Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, project No. FWRW 2021-0006.

**For citation:** Kolubaev A.V., Sizova O.V. Structure and properties of coatings obtained by gas-thermal spraying. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2024;67(6):710–715. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2024-6-710-715>

## ВВЕДЕНИЕ

Традиционным материалом для изготовления деталей механизмов и аппаратов являются конструкционные стали различного химического состава. В процессе эксплуатации таких деталей в условиях трения рабочих поверхностей изменяются их геометрические размеры и, как следствие, наблюдаются нарушения режимов работы механизмов и возникают опасные ситуации. Интенсивность процесса изнашивания зависит от ряда факторов: химического состава стали, ее эксплуатационных характеристик, нагрузки и скорости скольжения рабочей поверхности по контртелу. Важной задачей современного машиностроительного производства является создание научно обоснованного комплекса мероприятий по разработке технологий восстановления рабочих поверхностей работающих деталей машин и инструментальной оснастки. Одним из наиболее перспективных является способ газотермического восстановления изношенной поверхности путем нанесения металлических, неметаллических и комбинированных покрытий при нагреве исходного материала до жидкого или пластического состояния и его распыления газовой струей. К этому способу относятся ранее известный процесс металлизации распылением и аналогичные ему процессы напыления различных материалов. Процесс напыления состоит из нескольких стадий. Первые стадии обеспечивают распыление исходных материалов, а на последней стадии происходит их осаждение на мишень.

Процессы, протекающие при газотермическом напылении материалов, характеризуются определенными термодинамическими и аэродинамическими особенностями [1]. Эти особенности имеют практическое значение, так как именно они определяют качество слоя напыленного материала, его эксплуатационные возможности [2 – 9].

Процесс газотермического напыления (ГНТ) состоит из четырех стадий, непрерывно следующих одна за другой: расплавление исходного материала в количестве, необходимом для его непрерывного и бесперебойного распыления; распыление расплава на мелкие частицы струями сжатого воздуха или других газов; образование направленного потока (факела) частиц

расплавленных и распыленных материалов, которые под действием струи сжатого воздуха или других газов образуют слой напыленного материала в результате осаждения распыляемых частиц. Эти частицы под действием приобретенной ими кинетической энергии бомбардируют напыляемую поверхность и закрепляются на ее неровностях, а также на осажденных ранее частицах. Газотермическое напыление в настоящее время все чаще выступает альтернативой различным методам наплавки, которые требуют высоких затрат на расходные материалы, сложности обслуживания и обеспечения высокой степени безопасности при выполнении ремонтов [10 – 16].

В настоящей работе представлены результаты сравнительного исследования структуры и свойств газотермических покрытий из высокохромистой стали, нанесенных на рабочую поверхность штока виброгасителя пассажирского вагона способом газотермического напыления с нагревом металла до жидкого состояния и последующим его распылением газовой струей, и гальванического хромового покрытия.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали триботехнические свойства штока виброгасителя железнодорожного вагона с нанесенными на рабочую поверхность упрочняющими поверхностными слоями способами газотермического напыления стали 40X13 и гальванического хромирования. Химический состав покрытий определяли методом рентгенофлуоресцентного анализа, результаты которого сравнивали с химическим составом стали 40X13 согласно ГОСТ 5632 – 72. Изучали строение и толщину покрытий, распределение микротвердости в зоне покрытия – подложка, а также особенности разрушения покрытий при одинаковых условиях испытаний. Металлографические исследования поверхностей трения проводили на оптическом микроскопе НЕОРНОТ-21. Для измерения микротвердости использовался микротвердомер ПМТ-3.

Содержание элементов в покрытии, полученном газотермическим напылением проволоки из стали 40X13, следующее, мас. %: С 0,38; Si 0,21; Mn 0,64; Cr 0,87. Результаты сравнения содержания основных элементов

(главным образом, хрома) показали, что после наплавки материал покрытия соответствует стандартному составу стали марки 40X13 по ГОСТ 4543 – 71.

Износ роликов определяли по изменению диаметра, а колодок – по глубине и ширине канавок, образовавшихся на их поверхности за время проведения эксперимента. Сравнение триботехнических свойств гальванических и газотермических покрытий проводили на машине трения СМТ-1 по схеме ролик – колодка. В качестве ролика служили испытуемые образцы, а колодки изготавливались из чугуна марки СЧ 32-52. Условия испытаний были максимально приближены к реальным условиям эксплуатации виброгасителей вплоть до смазки, используемой в этой конструкции (масло марки ВМГЗ). Испытания проводили до начала разрушения покрытия методом контролирования изменения рельефа поверхности и появления признаков разрушения покрытия. После каждых трех часов эксперимента проводилось исследование структуры покрытия и подложки, измерялась микротвердость и фиксировалось изменение размеров роликов и колодок.

Применение новых конструктивных систем оборудования для высокоскоростного газопламенного напыления открывает новые возможности для дальнейшего развития метода, особенно в области защиты ответственных деталей машин и механизмов от абразивного изнашивания, коррозии и др. [6 – 12]. К числу таких деталей относится виброгаситель железнодорожного вагона (рис. 1), который представляет собой большой

масляный амортизатор, предназначенный для гашения колебаний вагона при его движении. На одном пассажирском вагоне имеется четыре виброгасителя. Как правило, через полгода эксплуатации виброгасители начинают выходить из строя вследствие разрушения хромового покрытия и потери масла, находящегося в виброгасителе. Затраты на суммарные потери масла, смену штоков и простой вагонов очень существенны. Следует отметить, что изношенные штоки, как правило, восстановлению не подлежат, а утилизируются. Повышение износостойкости этих ответственных деталей позволит значительно снизить затраты на техническое обслуживание железнодорожного транспорта и повысить безопасность железнодорожного движения [13 – 16].

Образцы для исследований структуры и триботехнических свойств были изготовлены из разных штоков виброгасителей: первый – из изношенного и восстановленного способом газотермического напыления проволокой из стали марки 40X13; второй – из штока с нанесенным по стандартной технологии защитным покрытием методом хромирования в жидком электролите.

Скорость истирания гальванических и газотермических покрытий на опытных образцах определяли по результатам проведения сравнительных испытаний на износ на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме, описанной выше. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 2.

Критерием для сравнения является время работы образцов до начала разрушения покрытия при нагрузке  $P = 400$  Н и частоте вращения вала машины трения  $\omega = 350$  об/мин. Степень истирания определяли по следующим параметрам: роликов – по изменению диаметра, колодок – по глубине и ширине канавок, образовавшихся на их поверхности за время проведения эксперимента.

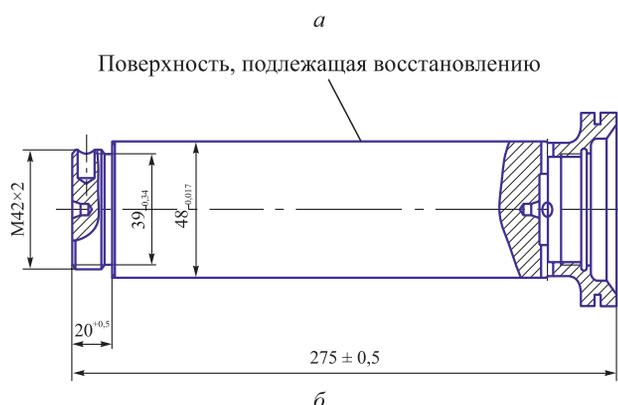


Рис. 1. Общий вид (а) и схема штока (б) виброгасителя

Fig. 1. General view (a) and diagram (b) of the vibration damper rod

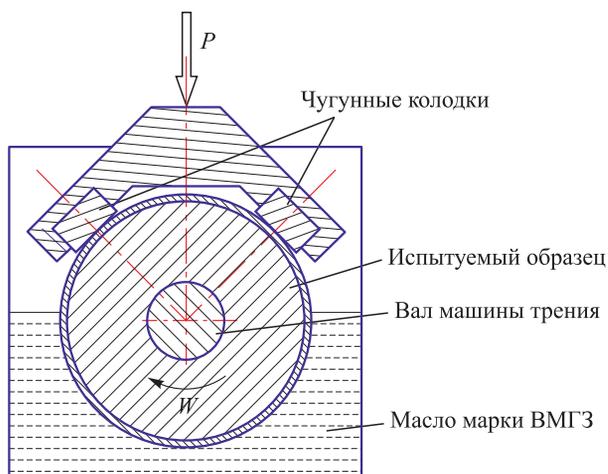


Рис. 2. Схема проведения эксперимента

Fig. 2. Experimental scheme

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Изучение структуры полученных покрытий выявило следующие различия: толщина плотного хромового покрытия не превышала 0,1 мм с резкой границей раздела между покрытием и подложкой (рис. 3, *а*). Толщина покрытия, нанесенного способом газотермического напыления, достигала примерно 2 мм, граница раздела также хорошо выявлялась, как и в предыдущем случае. Структура металла в зоне данного покрытия состояла из смешанных слоев напыляемого металла различной толщины (рис. 3, *б*). На границах раздела слоев наблюдались несплошности в виде трещин и пор. Рассчитанная пористость материала составила 5 – 6 %. Измерение микротвердости исследуемых образцов показало, что хромовое покрытие имело твердость порядка 700 HV, твердость газотермического покрытия не превышала 340 – 400 HV. Твердость материала подложки (сталь 45) соответствовала значениям 150 – 180 HV.

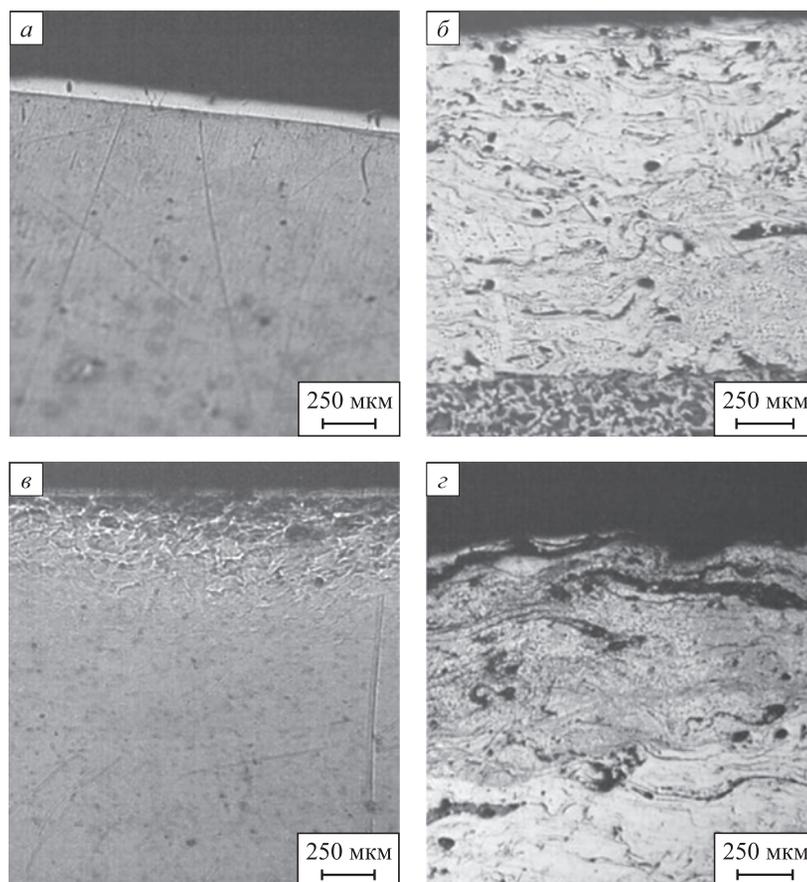
В течение трех часов испытаний существенных изменений в обоих образцах не произошло, но после шести часов испытаний на образце с хромовым покры-

тием появились первые признаки деформации материала основы и очагового выкрашивания покрытия. Они заключались в появлении деформированного слоя под покрытием глубиной 0,8 – 0,9 мм и отделении фрагментов покрытия по границе раздела (рис. 3, *в*). На снимке отчетливо видно, что разрушение хромового покрытия происходило путем отделения мелких частиц в местах, под которыми произошла деформация материала основы (штока).

Покрытие, полученное газотермическим напылением, сохранило свою исходную структуру до конца испытаний (9 ч) без видимых следов разрушений. Изнашивание данного покрытия происходило последовательным снятием тонкого поверхностного слоя без образования локальных участков с большой глубиной разрушения слоя напыленного материала.

## АНАЛИЗ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных результатов показал, что покрытие, нанесенное на шток виброгасителя распылением проволоки из стали 40Х13, обладает высокой изно-



**Рис. 3.** Микроструктура образцов в поперечном сечении:  
*а* – хромовое покрытие, нанесенное гальваническим способом; *б* – покрытие, полученное газотермическим напылением;  
*в* и *г* – разрушение хромового и напыленного покрытия

**Fig. 3.** Microstructure of the samples in cross section:  
*a* – chrome coating applied by galvanic method; *b* – coating obtained by gas-thermal spraying;  
*c* and *d* – destruction of chrome and of sprayed coatings

состойкостью в условиях граничного трения со смазкой и способно быть альтернативой гальваническому хромовому покрытию. Высокая износостойкость газотермического покрытия позволяет рекомендовать его не только для восстановления размеров изношенных деталей и повышения долговечности новых, но также для замены специальных антифрикционных подшипниковых сплавов. Полученные результаты исследований позволяют полагать, что в большинстве случаев экономически целесообразно использовать какие-либо другие методы, кроме газотермического напыления для нанесения антифрикционных покрытий на поверхности деталей, работающих в условиях трения скольжения с ограниченной или обильной подачей жидкого смазочного материала [17 – 20].

## Выводы

Установлено, что метод газотермического нанесения износостойких покрытий с нагревом металла до жидкого состояния с последующим его распылением газовой струей может успешно применяться при восстановлении изношенной поверхности стальных изделий.

Сравнительные исследования триботехнических свойств покрытий, нанесенных газотермическим напылением и гальваническим осаждением, показали, что с помощью газотермического способа можно надежно решать разнообразные технологические задачи, к которым относятся: напыление износостойких, антифрикционных и коррозионностойких покрытий; алитирование напылением (повышение жаростойкости); наращивание размеров изделий; наплавка и пайка напылением; устранение литейных дефектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Белоцерковский М.А. Триботехнические характеристики газопламенных покрытий. *Трение и износ*. 2000; 21(5):534–539.  
Belotserkovskii M.A. Tribotechnical characteristics of gas-flame coatings. *Friction and Wear*. 2000;21(5):534–539. (In Russ.).
2. Витязь П.А., Белоцерковский М.А., Кукареко В.А., Калининский Д.М., Сухоцкий П.Г., Ковалевская Ж.Г. Структура и свойства покрытий из стали 40X13, полученных с использованием различных методов газотермического напыления. *Физическая мезомеханика*. 2002;5(1):29–36. <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2002-00072>  
Vityaz P.A., Belotserkovskii M.A., Kukareko V.A., Kalinovskii D.M., Sukhotskii P.G., Kovalevskaya Zh.G. Structure and properties of 40Kh13 steel coatings obtained using various methods of gas-thermal spraying. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2002;5(1):29–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2002-00072>
3. Балдаев П.Х., Шестеркин Н.Г., Лулаков В.И., Шатов А.П. Особенности процессов высокоскоростного газоплазменного напыления. *Сварочное производство*. 2003;(5):43–46.  
Baldaev P.Kh., Shesterkin N.G., Lupakov V.I., Shatov A.P. Features of high-speed gas plasma spraying processes. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2003;(5):43–46. (In Russ.).
4. Белоцерковский М.А., Прядко А.С. Активированное газоплазменное и электродуговое напыление покрытий проволочными материалами. *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2006;(12):17–23.  
Belotserkovskii M.A., Pryadko A.S. Activated plasma gas and electric arc spraying of coatings with conductive materials. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2006;(12):17–23. (In Russ.).
5. Zavareh M.A., Sarhan A.A.D.M., Binti A.R.B., Basirun W.J. Plasma thermal spray of ceramic oxide coating on carbon steel with enhanced wear and corrosion resistance for oil and gas applications. *Ceramics International*. 2014;40(9A): 14267–14277.  
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.017>
6. Белоцерковский М.А. Прочностная надежность и триботехнические свойства газотермических покрытий, используемых в узлах трения. *Физическая мезомеханика*. 2007;10(2):103–108.  
<https://doi.org/10.24411/1683-805X-2007-00037>  
Belotserkovskii M.A. Strength reliability and tribotechnical properties of gas-thermal coatings used in friction units. *Fizicheskaya Mezomekhanika*. 2007;10(2):103–108. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/1683-805X-2007-00037>
7. Chu Z., Yang Y., Chen X., Yan D., Huang D., Lei W., Liu Z. Characterization and tribology performance of Fe-based metallic glassy composite coatings fabricated by gas multiple-tunnel plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2016;292:44–48.  
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.03.024>
8. Колубаев А.В., Белый А.В., Буяновский И.А. Механизмы деформирования и разрушения твердых покрытий в условиях фрикционного нагрева. *Известия вузов. Физика*. 2019;62(8):53–75.  
<http://doi.org/10.17223/00213411/62/8/52>  
Kolubaev A.V., Belyi A.V., Buyanovskii I.A. Mechanisms of deformation and destruction of hard coatings under frictional heating conditions. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2019;62(8): 53–75. (In Russ.). <http://doi.org/10.17223/00213411/62/8/52>
9. Гусев А.И., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Кибко Н.В., Башенко Л.П. Разработка порошковой проволоки для наплавки деталей, работающих в условиях износа. *Известия вузов. Черная Металлургия*. 2018;61(11):898–906.  
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-898-906>  
Gusev A.I., Usol'tsev A.A., Kozyrev N.A., Kibko N.V., Bashchenko L.P. Development of flux-cored wire for surfacing of parts operating under conditions of wear. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2018;61(11):898–906. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-11-898-906>
10. Белоцерковский В.А., Григорчик А.Н., Кукареко В.А., Константинов В.М. Структурно-фазовое состояние и износостойкость модифицированных ионами азота газотермических покрытий из высокохромистых сталей, нанесенных с использованием высокоэнтальпийного горячего газа. *Металловедение и термическая обработка*. 2019;(9(771)):46–54.

- Belotserkovskii V.A., Grigorichik A.N., Kukareko V.A., Konstantinov V.M. The structural and phase state and wear resistance of nitrogen ion-modified thermal gas coatings made of high-chromium steels applied using high-enthalpy combustible gas. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka*. 2019;(9(771)):46–54. (In Russ.).
11. Kolubaev A.V., Sizova O.V., Fortuna S.V., Vorontsov A.V., Ivanov A.N., Kolubaev E.A. Weld structure of low-carbon structural steel formed by ultrasonic-assisted laser welding. *Journal of Constructional Steel Research*. 2020;172:160190. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106190>
  12. Кукареко В.А., Белоцерковский В.А., Григорчик А.Н., Сосновский А.В. Структура и триботехнические свойства покрытия Ti-TiN, полученного высокоскоростным напылением. *Трение и износ*. 2022;43(5):458–465. <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2022-43-5-458-465>  
Kukareko V.A., Belotserkovskii V.A., Grigorichik A.N., Sosnovskii A.V. Structure and tribological properties of the coating Ti-TiN, obtained by high-speed deposition. *Friction and Wear*. 2022;43(5):458–465. (In Russ.). <https://doi.org/10.32864/0202-4977-2022-43-5-458-465>
  13. Артеменко С.А., Орлик Г.В., Орлик А.Г. Применение износостойкого шнурового материала по восстановлению изношенных зубьев карьерного экскаватора. *Сварочное производство*. 2021;(10):63–69. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2021-10-63-69>  
Artemenko S.A., Orlik G.V., Orlik A.G. The use of wear-resistant cord material for the restoration of worn teeth of a quarry excavator. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2021;(10):63–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2021-10-63-69>
  14. Жаркевич А.М., Нуржанова О.А., Бессонов А.В. Определение оптимальных технологических режимов наплавки при восстановлении деталей типа тел вращения. *Сварочное производство*. 2022;(5):35–40.
  - Zharkevich A.M., Nurzhanova O.A., Bessonov A.V. Determination of the optimal technological modes of surfacing when restoring parts such as bodies of revolution. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2022;(5):35–40. (In Russ.).
  15. Liu S.-H., Trelles J.P., Li C.-J., Li C.-X., Guo H.-B. A review and progress of multiphase flows in atmospheric and low pressure plasma spray advanced coating. *Materials Today Physics*. 2022;27:100832. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100832>
  16. Singh S., Goyal K., Bhatia R. A review on protection of boiler tube steels with thermal spray coatings from hot corrosion. *Materials Today: Proceedings*. 2022;56(1):379–383. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.219>
  17. Li N., Tariq N. ul H., Che Y., Liu S., Wang J., Cui X., Xiong T. Corrosion-resistant thermal spray coatings for low-alloy steel in contact with molten nitrate salts in solar power plants. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2023;59:112432. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112432>
  18. Samal S., Zeman J., Kopeček J., Šittner P. Thermal plasma spraying of NiTi powder for thick coating of shape memory alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024;984:173962. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.173962>
  19. Gupta M., Li X.-H., Peng R., Ottosson A., Gillberge P., Girgulis J. Understanding the effect of bondcoat surface treatment on enhanced lifetime of suspension plasma sprayed thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2024;482:130716. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2024.130716>
  20. Lakkannavar V., Yogesha K.B., Prasad C.D., Phanden R.K., Srinivasa G., Prasad S.C. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion applications – A comprehensive review. *Results in Surfaces and Interfaces*. 2024;16:100250. <https://doi.org/10.1016/j.rsufi.2024.100250>

## Сведения об авторах

## Information about the Authors

**Александр Викторович Колубаев**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН  
ORCID: 0000-0002-2839-5249

**Ольга Владимировна Сизова**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН  
ORCID: 0000-0001-9177-6602  
E-mail: ovs@ispms.tsc.ru

**Aleksandr V. Kolubaev**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
ORCID: 0000-0002-2839-5249

**Ol'ga V. Sizova**, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
ORCID: 0000-0001-9177-6602  
E-mail: ovs@ispms.tsc.ru

Поступила в редакцию 21.08.2024  
После доработки 03.10.2024  
Принята к публикации 17.10.2024

Received 21.08.2024  
Revised 03.10.2024  
Accepted 17.10.2024