



Оригинальная статья

УДК 621.791.048:621.793

DOI 10.17073/0368-0797-2022-9-637-643

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2396>

СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ СВЕРХЗВУКОВОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ С АЭРОЗОЛЬНЫМ ФЛЮСОВАНИЕМ

А. В. Коломейченко¹, В. Н. Логачев², В. Б. Деев^{3,4}, Н. Ю. Дударева⁵

¹ Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ» (Россия, 125438, Москва, ул. Автомоторная, 2)

² Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина (Россия, 302019, Орел, ул. Генерала Родина, 69)

³ Уханьский текстильный университет (China, 430072, Hubei Province, Wuchang District, Wuhan, Wuhan University, Hongshance Road, 34)

⁴ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Россия, 119049, Москва, Ленинский пр., 4)

⁵ Уфимский государственный авиационный технический университет (Россия, 450000, Республика Башкортостан, Уфа, ул. К. Маркса, 12)

Аннотация. При неоспоримых достоинствах метода электродуговой металлизации, он обладает и недостатками, например, такими, как выгорание легирующих элементов и высокое содержание окислов в наносимом покрытии. Решение данной проблемы и нейтрализации отрицательного влияния окисления наносимого металла кислородом, содержащимся в используемом воздухе, возможно за счет применения аэрозольного флюсования при металлизации. В статье рассмотрен эффективный метод повышения физико-механических свойств электрометаллизационного покрытия за счет использования аэрозольного флюсования. Сущность данного метода состоит в том, что в факел расплавленного электрической дугой металла вместе со сжатым воздухом вводится аэрозоль, состоящий из водного раствора химических неорганических материалов. Водный раствор заливается в гидродиспергатор, подключенный к воздушному каналу металлатора. Аэрозольное флюсование позволяет раскислять и легировать металл при электродуговой металлизации, тем самым повышая уровень его свойств. Представлены результаты топографических исследований электрометаллизационных покрытий. Полученные покрытия имеют структуру с размерами зерен от 200 до 2500 нм, как с ярко выраженными, так и слабо заметными границами между зерен. Установлено, что при использовании аэрозольного флюсования при электродуговой металлизации в покрытиях формируется более мелкозернистая структура и повышается прочность. Проведенные металлографические исследования показали, что толщина электрометаллизационного покрытия варьируется от 2490 до 2586 мкм. Использование аэрозольного флюсования при электродуговой металлизации не оказывает существенного влияния на толщину наносимого покрытия. Исследование микротвердости электрометаллизационных покрытий показало, что использование при металлизации аэрозольного флюсования с флюсом, состоящим из Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, позволяет увеличить ее значения в 1,6 – 1,9 раз.

Ключевые слова: электродуговая металлизация, покрытие, аэрозольное флюсование, проволока, металлатор, структура, микротвердость

Для цитирования: Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Деев В.Б., Дударева Н.Ю. Свойства покрытий, полученных сверхзвуковой электродуговой металлизацией с аэрозольным флюсованием // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 9. С. 637–643.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-637-643>

Original article

PROPERTIES OF COATINGS OBTAINED BY SUPERSONIC ELECTRIC ARC METALLIZATION WITH AEROSOL FLUXING

A. V. Kolomeichenko¹, V. N. Logachev², V. B. Deev^{3,4}, N. Yu. Dudareva⁵

¹ Central Scientific Research Automobile and Automotive Engine Institute “NAMI” (2 Aviamotornaya Str., Moscow 125438, Russian Federation)

² N.V. Parakhin Orel State Agrarian University (69 Generala Rodina Str., Orel 302019, Russian Federation)

³ Wuhan Textile University (34 Hongshance Road, Wuhan University, Wuhan, Wuchang District, Hubei Province, 430072, China)

⁴ National University of Science and Technology “MISIS” (4 Leninskii Ave., Moscow 119049, Russian Federation)

⁵ Ufa State Aviation Technical University (12 K. Marksa Str., Ufa, Republic of Bashkortostan 450000, Russian Federation)

Abstract. The method of electric arc metallization has both undeniable advantages and some disadvantages. For example, there is a burnout of alloying elements and a high content of oxides in the applied coating. Aerosol fluxing during metallization can solve this problem and neutralize the negative oxidative effect of interaction of the applied metal with air oxygen. This article discusses an effective method to improve physical and mechanical properties of an electrometallization coating using aerosol fluxing. The essence of this method is introduction of an aerosol together with compressed air into a torch of molten metal. This aerosol consists of an aqueous solution of the chemical inorganic materials. Such the aqueous solution is poured into a hydrodispersator, which is connected to the air channel of the metallizer. Aerosol fluxing makes it possible to deoxidize and ligate metal during electric arc metallization. As a result, the physical and mechanical properties of the metal increase. The paper considers the results of topographic studies of electrometallization coatings. Formed coatings have a structure with grain sizes from 200 to 2500 nm and also have pronounced and subtle grain boundaries. Aerosol fluxing with electric arc metallization forms a coating with finer-grained structure, which increases their strength. It is established that formed coatings have a finer-grained structure and increased strength when using aerosol fluxing during electric arc metallization. Metallographic studies showed that the thickness of the electrometallization coating varies from 2490 μm to 2586 μm . The use of aerosol fluxing during electric arc metallization does not significantly affect the coating thickness. The microhardness of electrometallization coatings was studied. This study showed that the use of aerosol flux consisting of Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ during metallization increases microhardness of electrometallization coatings by 1.6 – 1.9 times.

Keywords: electric arc metallization, coating, aerosol fluxing, wire, metallizer, structure, microhardness

For citation: Kolomeichenko A.V., Logachev V.N., Deev V.B., Dudareva N.Yu. Properties of coatings obtained by supersonic electric arc metallization with aerosol fluxing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 9, pp. 637–643. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-637-643>

ВВЕДЕНИЕ

Электродуговая металлизация (ЭМ) широко применяется для нанесения покрытий различного назначения. Исследованию свойств покрытий, полученных ЭМ, посвящены работы [1 – 4]. Процесс нанесения покрытий рассматривается в работах [5 – 7]. Часть исследований направлена на совершенствование оборудования для ЭМ [8, 9], в другой части изучаются материалы, применяемые при ЭМ [10 – 12]. Однако проволоки, которые обеспечивают высокие физико-механические свойства электрометаллизационных покрытий (материалы марок 50ХФА, 40Х13, ПП-ПН-100Х15, ПП-ТП-1), имеют высокую стоимость [13 – 16]. Это сдерживает использование ЭМ в машиностроении и ремонтном производстве [17 – 20].

Для решения данной проблемы предлагается использовать более дешевую сварочную проволоку марки Св08Г2С (ГОСТ 2246-70) и легировать ее в процессе ЭМ аэрозольным флюсованием (АФ) за счет компонентов флюса Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ [21 – 24]. Сущность метода аэрозольного флюсования, предназначенного для раскисления и легирования металла при электродуговой металлизации, заключается в том, что в факел диспергированного расплавленного электрической дугой металла вводится вместе со сжатым воздухом аэрозоль, представляющая собой водный раствор химических неорганических материалов, которые при растворении в воде прошли этап электролитической диссоциации.

Под действием высокой температуры электрической дуги происходит термическая диссоциация с выделением активных элементов (С, СО) и последующий процесс карботермии (раскисления железа), который используется в металлургии.

Целью настоящего исследования являлось установление влияния аэрозольного флюсования при сверхзвуковой электродуговой металлизации на свойства получаемых покрытий.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

При проведении исследований в качестве материала основы для изготовления образцов использовали сталь 20 (ГОСТ 1050-2013), достаточно широко применяемую при изготовлении изделий различного назначения в машиностроении [25, 26]. Нанесение покрытий проводилось сверхзвуковым электродуговым металлизатором ЭДМ-9ШД (производитель ГНУ ГОСНИТИ, Россия). В качестве источника электрического тока применяли сварочный выпрямитель ВДУ-506 (производитель ООО «ИТС-Инжиниринг», Россия). Аэрозольное флюсование производилось подключением в воздушный поток перед металлизатором гидродиспергатора.

Топографии структуры покрытий изучали на атомном силовом микроскопе FemtoScan (производитель ООО НПП «Центр перспективных технологий», Россия).

Металлографические исследования образцов проводились при помощи анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел Siams 700 (производитель ООО «СИАМС», Россия).

Микротвердость покрытий исследовали на микротвердомере Durascan 20 (производитель EMCO-TEST PrüfmaSchinen GmbH, Австрия). Измерение микротвердости образцов осуществляли от края покрытия на расстоянии 30 мкм в глубину основы с переменным шагом (расстоянием между центрами отпечатков) как по горизонтали, так и по вертикали. При исследовании сравнивались показатели толщины и микротвердости электрометаллизационных покрытий (ЭМ-покрытий), полученных методом ЭМ без АФ и с АФ с использованием флюса, состоящего из кальцинированной соды Na_2CO_3 , криолита Na_3AlF_6 , тетрабората натрия $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Содержание компонентов в водном растворе составляло $C_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 42$ г/л, $C_{\text{Na}_3\text{AlF}_6} = 6$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7} = 12$ г/л и было выбрано на основании ранее проведенных исследований с использованием данного флюса [27, 28]. Режимы нанесения ЭМ-покрытий: сила тока 180 А, напряжение

32 В, скорость истечения воздушного потока 540 м/ч, материал проволоки Св-08Г2С, ГОСТ 10543-98, диаметр проволоки 2 мм, давление воздуха 0,60 – 0,65 МПа, дистанция металлизации 160 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ

В современных сверхзвуковых металлизаторах расплавленный металл с помощью струи сжатого воздуха диспергируется на мелкие частицы, которые с большой скоростью увлекаются воздушной струей и наносятся на подложку. В течение полета жидкие частицы металла в зависимости от величины сил поверхностного натяжения, скорости их полета и дистанции металлизации приобретают сферическую каплевидную или осколочную форму.

При соударении с основой частицы металла деформируются и частично разбрызгиваются. Форма сплюснутых металлических частиц, составляющих покрытие, позволяет сделать вывод, что в момент соударения они были в пластичном и круглом состоянии, при котором они легко деформируются.

Температура частиц металла зависит от его свойств, способа плавления, размера частиц, скорости полета и дистанции металлизации.

Установлено, что крупные частицы металла достигают поверхности преимущественно в жидком состоянии, а более мелкие в пластичном и даже твердом. При этом, независимо от размеров, частицы металла, которые находятся в центре воздушной струи, охлаждаются незначительно, а на периферии – более энергично. Поэтому частицы металла, составляющие покрытие, достигают подложки в различном состоянии. Преобладающее их количество находится в жидком или полу-

жидком (пластичном) состоянии и лишь малая часть – в отвердевшем.

За счет кинетической энергии летящих со сверхзвуковой скоростью частиц металла при ударе об основу окружающая их окисная оболочка разрушается, а жидкий металл смачивает поверхность и, заполняя неровности, плотно контактирует с ней. Более холодные частицы металла при ударе деформируются, расплющиваются и, перемешиваясь с более горячими, образуют единичный слой покрытия.

В момент удара о подложку частицы металла одновременно с деформацией подвергаются резкому охлаждению холодной струей сжатого воздуха, что вызывает мгновенную их закалку. Происходящие при этом структурные изменения в частицах с различной массой и температурой протекают неодинаково. Этим объясняется, например, наличие в покрытии металла со смешанными структурами из аустенита, перлита, сорбита и мартенсита [22].

На рис. 1 приведены изображения топографии структуры покрытий, где по осям показан размер площадки, а на цветовой полосе – высотный параметр микронеровностей. На представленных изображениях просматривается зернистая структура ЭМ-покрытия с размерами зерен от 200 до 2500 нм.

Следует отметить, что в исследуемой структуре наблюдается размерная неоднородность зерен, что явно прослеживается на рис. 1, б. Здесь, наряду с «большими» зернами размером более 2000 нм, имеющими ярко выраженные границы, наблюдаются «маленькие» зерна размером 200 – 300 нм и слабо заметной границей между ними. Расположение рассматриваемых зерен имеет хаотическое чередование. Применение аэрозольного флюсования способствует образованию в металлизационном покрытии значительно большего количества

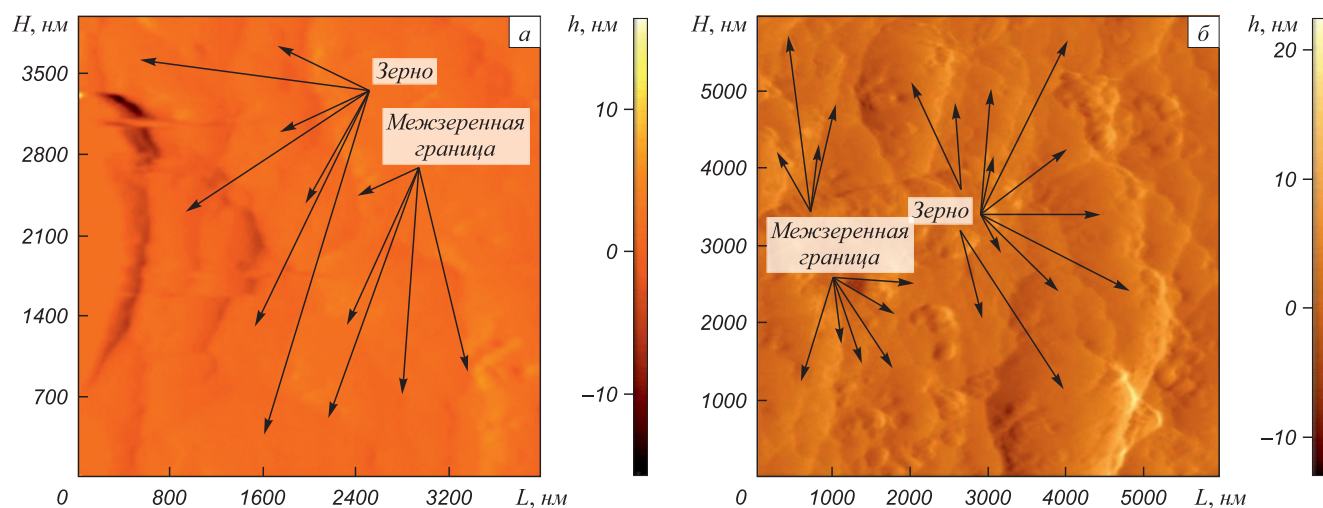


Рис. 1. Изображения топографии структуры покрытий:
а – ЭМ без АФ; б – ЭМ с АФ

Fig. 1. Topography images of the coating structure:
а – electric arc metallization (EAM) without aerosol fluxing (AF); б – EAM with AF

«маленьких» зерен, что повышает прочность сформированного ЭМ-покрытия.

РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Толщина металлизационных покрытий в зависимости от их назначения и различных форм поверхностей изделий, на которые они наносятся, варьируется от 0,05 до 10 мм. Например, на деталях типа «вал» диаметром 100 – 150 мм минимальная толщина ЭМ-покрытия с припуском под механическую обработку должна составлять 1,6 – 2,5 мм на сторону [22].

На рис. 2 представлен снимок ЭМ-покрытия, толщина которого варьируется от 2490 до 2586 мкм. Использование аэрозольного флюсования при ЭМ значимого влияния на толщину наносимого покрытия не оказывает.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ ПОКРЫТИЙ

Твердость покрытия является одной из важных характеристик, определяющих его эксплуатационные возможности [29 – 33]. Условия работы деталей машин различного назначения требуют соответствующую твердость поверхности изделия. Например, высокотвердые покрытия используются при восстановлении таких тяжело нагруженных деталей, как коленчатые валы двигателей, шейки валков прокатных станов, осей железнодорожных вагонов, валов роторов глубинных насосов и др. Для неподвижных посадок под подшипники качения обычно используются покрытия средней твердости.

При ЭМ твердость металлопокрытия зависит не только от присадочного материала (проволоки). На одном и том же материале можно получить покрытия, имеющие различную твердость, которая зависит от целого ряда факторов – величины электрического тока,

дистанции ЭМ, давления сжатого воздуха и скорости подачи проволоки. Твердость ЭМ-покрытий, при прочих равных условиях, можно повысить за счет использования АФ.

На рис. 3, 4 представлены результаты исследования микротвердости образцов, полученных методом ЭМ без применения и с применением АФ.

Увеличение микротвердости ЭМ-покрытия за счет применения АФ объясняется тем, что легирующие компоненты, входящие в состав флюса в результате термодиффузионных процессов, образуют упрочняющие структуры за счет получения твердых растворов (цементита, нитрида и др.) [33 – 37].

Выводы

При неоспоримых достоинствах метода электродуговой металлизации, он обладает и недостатками, например, такими, как выгорание легирующих элементов и высокое содержание окислов в наносимом покрытии. Решение этой проблемы и нейтрализации отрицатель-

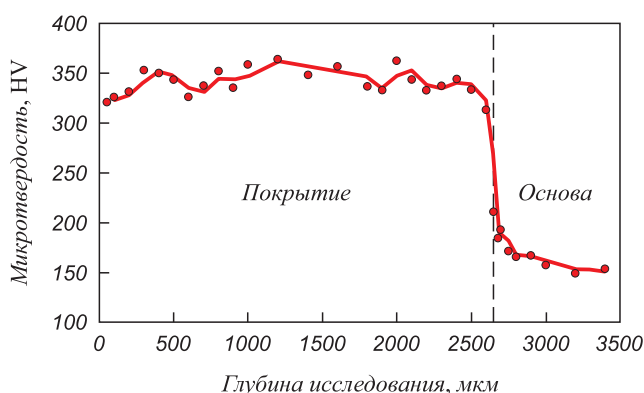


Рис. 3. Микротвердость по толщине ЭМ-покрытия, полученного без применения АФ

Fig. 3. Microhardness by thickness of the EAM coating obtained without AF

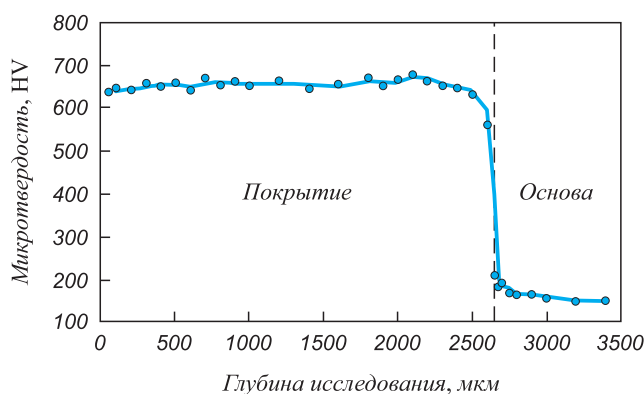


Рис. 4. Микротвердость по толщине ЭМ-покрытия, полученного с применением АФ

Fig. 4. Microhardness by thickness of the EAM coating obtained using AF

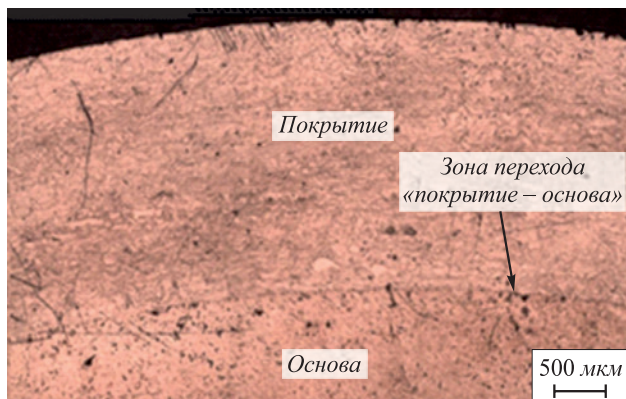


Рис. 2. Снимок поперечного шлифа образца с ЭМ-покрытием, $\times 100$

Fig. 2. Cross section image of the sample with EAM coating (magnification $\times 100$)

ного влияния окисления наносимого металла возможно за счет применения аэрозольного флюсования воздушного потока.

Использование аэрозольного флюсования позволяет значительно улучшить свойства металлизационных покрытий. Применение флюса, состоящего из водного раствора, содержащего компоненты Na_2CO_3 , Na_3AlF_6 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, способствует образованию мелкозернистой структуры, что повышает прочность ЭМ-покрытия.

Микротвердость ЭМ-покрытия при этом увеличивается в 1,6 – 1,9 раз.

На толщину наносимого покрытия использование флюса при ЭМ значимого влияния не оказывает.

Проведенные ранее сравнительные исследования адгезионно-когезионной прочности показали, что без АФ прочность сцепления составляет 30 – 35 МПа, использование АФ позволяет увеличить прочность сцепления до 60 – 66 МПа [22].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Korobov Yu.S., Boronenkov V.N. Calculating the parameters of movement, heating and oxidation of particles in electric arc metal-lising // *Welding International*. 1998. Vol. 12. No. 9. P. 726–730. <http://doi.org/10.1080/09507119809452043>
2. Korobov Yu.S., Boronenkov V.N. Kinetics of interaction of sprayed metal with oxygen in electric arc metallising // *Welding International*. 2004. Vol. 18. No. 1. P. 42–48. <http://doi.org/10.1533/wint.2004.3242>
3. Lyalyakin V.P., Murzaev V.P., Solovov R.Yu., Slinko D.B. Physico-mechanical properties of coatings produced by electric arc metal-lising with flux-cored wires // *Welding International*. 2017. Vol. 31. No. 9. P. 729–732. <http://doi.org/10.1080/09507116.2017.1315078>
4. Sergeev V.V., Spiridonov Yu.L., Farakhshin I.I. Reconditioning crankshafts of domestic and foreign diesel engines by electric arc metallising // *Welding International*. 2004. Vol. 18. No. 7. P. 578–580. <http://doi.org/10.1533/wint.2004.3331>
5. Şerban V.A., Roşu R.A., Bucur A.I., Pascu D.R. Deposition of titanium nitride layers by electric arc-reactive plasma spraying method // *Applied Surface Science*. 2013. Vol. 265. P. 245–249. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.187>
6. Newbery A.P., Grant P.S., Neiser R.A. The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying // *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 195. No. 1. P. 91–101. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.12.035>
7. Sokolov Yu.V., Zheleznyi V.S. The fractal structure of a carbon deposit formed during graphite spraying in an electric arc // *Technical Physics Letters*. 2003. Vol. 29. No. 4. P. 350–351. <http://doi.org/10.1134/1.1573314>
8. Royanov V.A., Bovikov V.I. Equipment for electric arc metallizing with pulsed discharge of the air-spraying jet // *Welding International*. 2016. Vol. 30. No. 4. P. 315–318. <http://doi.org/10.1080/01431161.2015.1058006>
9. Aleksandrov V.P., Glupanov V.N. Cleaning aspiration air from chambers for electric-arc metal spraying // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2002. Vol. 38. No. 1–2. P. 94–95. <http://doi.org/10.1023/A:1015242825702>
10. Xing S.B., Xiao K., Li X.-G., Liu A.Q., Li L., Wang E.Q. Corrosion resistance of Zn-Al-Mg-La-Ce coatings by electric arc spraying // *Beijing Keji Daxue Xuebao / Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2012. Vol. 34. No. 10. P. 1167–1172.
11. Pereira Dos Santos L., Flores-Sahagun T.S., Paredes R.S.C., Bozz Ferla S.M., Satyanarayana K.G. Study on the deposition of stainless steel on polymeric substrates by arc electric thermal spraying // *Materials Research Express*. 2019. Vol. 6. No. 10. Article 105314. <http://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2a2f>
12. Kirsankin A.A., Kalaida T.A., Kaplan M.A., Smirnov M.A., Ivan-nikov A.Yu., Sevostyanov M.A. Characterization of spherical stainless steel powders prepared by electric arc spraying process // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 848. Article 012033. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012033>
13. Лялякин В.П. Восстановление деталей машин – важное направление импортозамещения в агропромышленном комплексе // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2019. № 9. С. 3–5.
1. Korobov Yu.S., Boronenkov V.N. Calculating the parameters of movement, heating and oxidation of particles in electric arc metal-lising. *Welding International*. 1998, vol. 12, no. 9, pp. 726–730. <http://doi.org/10.1080/09507119809452043>
2. Korobov Yu.S., Boronenkov V.N. Kinetics of interaction of sprayed metal with oxygen in electric arc metallising. *Welding International*. 2004, vol. 18, no. 1, pp. 42–48. <http://doi.org/10.1533/wint.2004.3242>
3. Lyalyakin V.P., Murzaev V.P., Solovov R.Yu., Slinko D.B. Physico-mechanical properties of coatings produced by electric arc metal-lising with flux-cored wires. *Welding International*. 2017, vol. 31, no. 9, pp. 729–732. <http://doi.org/10.1080/09507116.2017.1315078>
4. Sergeev V.V., Spiridonov Yu.L., Farakhshin I.I. Reconditioning crankshafts of domestic and foreign diesel engines by electric arc metallising. *Welding International*. 2004, vol. 18, no. 7, pp. 578–580. <http://doi.org/10.1533/wint.2004.3331>
5. Şerban V.A., Roşu R.A., Bucur A.I., Pascu D.R. Deposition of titanium nitride layers by electric arc-reactive plasma spraying method. *Applied Surface Science*. 2013, vol. 265, pp. 245–249. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.10.187>
6. Newbery A.P., Grant P.S., Neiser R.A. The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying. *Surface and Coatings Technology*. 2005, vol. 195, no. 1, pp. 91–101. <http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.12.035>
7. Sokolov Yu.V., Zheleznyi V.S. The fractal structure of a carbon deposit formed during graphite spraying in an electric arc. *Technical Physics Letters*. 2003, vol. 29, no. 4, pp. 350–351. <http://doi.org/10.1134/1.1573314>
8. Royanov V.A., Bovikov V.I. Equipment for electric arc metallizing with pulsed discharge of the air-spraying jet. *Welding International*. 2016, vol. 30, no. 4, pp. 315–318. <http://doi.org/10.1080/01431161.2015.1058006>
9. Aleksandrov V.P., Glupanov V.N. Cleaning aspiration air from chambers for electric-arc metal spraying. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2002, vol. 38, no. 1–2, pp. 94–95. <http://doi.org/10.1023/A:1015242825702>
10. Xing S.B., Xiao K., Li X.-G., Liu A.Q., Li L., Wang E.Q. Corrosion resistance of Zn-Al-Mg-La-Ce coatings by electric arc spraying. *Beijing Keji Daxue Xuebao / Journal of University of Science and Technology Beijing*. 2012, vol. 34, no. 10, pp. 1167–1172.
11. Pereira Dos Santos L., Flores-Sahagun T.S., Paredes R.S.C., Bozz Ferla S.M., Satyanarayana K.G. Study on the deposition of stainless steel on polymeric substrates by arc electric thermal spraying. *Materials Research Express*. 2019, vol. 6, no. 10, article 105314. <http://doi.org/10.1088/2053-1591/ab2a2f>
12. Kirsankin A.A., Kalaida T.A., Kaplan M.A., Smirnov M.A., Ivan-nikov A.Yu., Sevostyanov M.A. Characterization of spherical stainless steel powders prepared by electric arc spraying process. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020, vol. 848, article 012033. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/848/1/012033>
13. Lyalyakin V.P. Restoration of machine parts as an important direction of import substitution in agro-industrial complex. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*. 2019, no. 9, pp. 3–5. (In Russ.).

14. Воробьев П.А., Юсим М.Ю., Литовченко Н.Н., Денисов В.И. Метод аэрозольного флюсования при электродуговой металлизации // Труды ГОСНИТИ. 2008. Том 101. С. 201–204.
15. Матюшкин Б.А., Денисов В.И., Толкачев А.А. Регулируемое изменение процентного содержания элементов в рабочем слое при восстановлении деталей электродуговой металлизацией // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 127. С. 166–170.
16. Технологические процессы в техническом сервисе машин и оборудования: Учебное пособие / И.Н. Кравченко, А.Ф. Пузырьков, В.М. Корнеев, А.Г. Пастухов, А.В. Коломейченко, А.А. Пузырьков. Москва: ИНФРА-М, 2017. 346 с.
17. Технология ремонта машин / В.М. Корнеев, В.С. Новиков, И.Н. Кравченко и др.; под ред. В.М. Корнеева. Москва: ИНФРА-М, 2018. 312 с.
18. Восстановление износа деталей машин / В.А. Горохов, О.Г. Девоино, В.П. Иванов и др. Старый Оскол: ТНТ, 2020. 380 с.
19. Олефиренко Н.А., Овчинников В.В. Технологические особенности восстановления коленчатых валов компрессоров фреона электродуговой металлизацией // Известия Московского государственного индустриального университета. 2012. № 1 (25). С. 27–31.
20. Сергеев В.В., Куликов П.Р. Восстановление коленчатых валов дизельных двигателей сверхзвуковой электродуговой металлизацией // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 10. С. 37–40.
21. Дудан А.В., Ворона Т.В., Довжук С.А., Брусило Ю.В., Салимов Р.М., Волков Ю.В. Выбор оборудования для упрочнения и восстановления деталей автомобилей электродуговым напылением // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Промышленность. Прикладные науки. 2014. № 11. С. 121–126.
22. Электродуговая металлизация. Теория, технологии, оборудование / Н.Н. Литовченко, В.П. Лялякин, А.В. Коломейченко и др. Курск: Университетская книга, 2022. 203 с.
23. Лялякин В.П., Мурзаев В.П., Соловьев Р.Ю., Слинко Д.Б. Физико-механические свойства покрытий, полученных электродуговой металлизацией порошковых проволок // Технология машиностроения. 2017. № 5. С. 24–28.
24. Соловьев Р.Ю., Воробьев П.А., Литовченко Н.Н. Металлокарботермические методы снижения окисления диспергированного металла при электродуговой металлизации // Сварочное производство. 2012. № 3. С. 43–47.
25. Матюшкин Б.А., Денисов В.И., Толкачев А.А. Технологические особенности электродуговой металлизации в отрасли АПК // Технология машиностроения. 2016. № 10. С. 32–37.
26. Литовченко И.Н., Денисов В.И., Воробьев П.А., Юсим М.Ю. Восстановление деталей электродуговой металлизацией // Техника в сельском хозяйстве. 2008. № 2. С. 28–32.
27. Коломейченко А.В., Логачев В.Н., Измалков А.А. Целесообразность использования аэрозольного флюсования при электродуговой металлизации // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2018. № 3 (47). С. 62–68.
28. Logachev V.N., Kolomeichenko A.V., Kuznetsov Yu.A., Solov'ev R.Yu., Denisov V.I., Sharifullin S.N. Aerosol fluxing in electric arc metallization // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 240. Article 012049. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/240/1/012049>
29. Бороненков В.Н., Коробов Ю.С. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2012. 268 с.
30. Pokhmurska H., Dovhunyk V., Student M., Bielanska E., Beltowska E. Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires // Surface & Coating Technology. 2002. Vol. 151–152. P. 490–194. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01577-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01577-8)
31. Pokhmurskii V., Dovhunyk V., Student M., Pokhmurska H., Vynar V., Sydorak I. Triboelectrochemical behaviour of arc sprayed coatings on aluminium alloys // Inzynieria Powierzchni. 2008. No. 1. P. 9–13.
14. Vorob'ev P.A., Yusim M.Yu., Litovchenko N.N., Denisov V.I. Aerosol fluxing method for electric arc metallization. *Trudy GOSNITI*. 2008, vol. 101, pp. 201–204. (In Russ.).
15. Matyushkin B.A., Denisov V.I., Tolkachev A.A. Adjustable change in percentage of elements in working layer during parts restoration by electric arc metallization. *Trudy GOSNITI*. 2017, vol. 127, pp. 166–170. (In Russ.).
16. Kravchenko I.N., Puzryakov A.F., Korneev V.M., Pastukhov A.G., Kolomeichenko A.V., Puzryakov A.A. *Technological Processes in Technical Service of Machines and Equipment*. Moscow: INFRA-M, 2017, 346 p. (In Russ.).
17. Korneev V.M., Novikov V.S., Kravchenko I.N., etc. *Machine Repair Technology*. Korneev V.M. ed. Moscow: INFRA-M, 2018, 312 p. (In Russ.).
18. Gorokhov V.A., Devoino O.G., Ivanov V.P., etc. *Restoring the Wear of Machine Parts*. Stary Oskol: TNT, 2020, 380 p. (In Russ.).
19. Olefirenko N.A., Ovchinnikov V.V. Technological features of restoration of crankshafts of freon compressors by electric arc metallization. *Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo industrial'nogo universiteta*. 2012, vol. 25, no. 1, pp. 27–31. (In Russ.).
20. Sergeev V.V., Kulikov P.R. Restoration of crankshafts of diesel engines by supersonic electric arc metallization. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii*. 2008, no. 10, pp. 37–40. (In Russ.).
21. Dudan A.V., Vorona T.V., Dovzhuk S.A., Brusilo Yu.V., Salimov R.M., Volkov Yu.V. Selection of equipment for hardening and restoration of car parts by electric arc spraying. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya V: Promyshlennost'. Prikladnye nauki*. 2014, no. 11, pp. 121–126. (In Russ.).
22. Litovchenko N.N., Lyalyakin V.P., Kolomeichenko A.V., etc. *Electric Arc Metallization. Theory, Technologies, Equipment: Monograph*. Kursk: Universitetskaya kniga, 2022, 203 p. (In Russ.).
23. Lyalyakin V.P., Murzaev V.P., Solov'ev R.Yu., Slinko D.B. Physical and mechanical properties of coatings obtained by electric arc metallization with powder wires. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2017, no. 5, pp. 24–28. (In Russ.).
24. Solov'ev R.Yu., Vorob'ov P.A., Litovchenko N.N. Metal-carbothermal methods for reducing oxidation of dispersed metal during electric arc metallization. *Svarochnoe proizvodstvo*. 2012, no. 3, pp. 43–47. (In Russ.).
25. Matyushkin B.A., Denisov V.I., Tolkachev A.A. Technological features of electric arc metallization in agro-industrial complex. *Tekhnologiya mashinostroeniya*. 2016, no. 10, pp. 32–37. (In Russ.).
26. Litovchenko I.N., Denisov V.I., Vorob'ev P.A., Yusim M.Yu. Restoration of parts by electric arc metallization. *Tekhnika v sel'skom khozyaistve*. 2008, no. 2, pp. 28–32. (In Russ.).
27. Kolomeichenko A.V., Logachev V.N., Izmailkov A.A. Expediency of using aerosol fluxing during electric arc metallization. *Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2018, no. 3(47), pp. 62–68. (In Russ.).
28. Logachev V.N., Kolomeichenko A.V., Kuznetsov Yu.A., Solov'ev R.Yu., Denisov V.I., Sharifullin S.N. Aerosol fluxing in electric arc metallization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 240, article 012049. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/240/1/012049>
29. Boronenkov V.N., Korobov Yu.S. *Fundamentals of Arc Metallization. Physical and Chemical Laws*. Yekaterinburg: Izd-vo Ural'skogo universiteta, 2012, 268 p. (In Russ.).
30. Pokhmurska H., Dovhunyk V., Student M., Bielanska E., Beltowska E. Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr based powder wires. *Surface & Coating Technology*. 2002, vol. 151–152, pp. 490–194. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(01\)01577-8](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(01)01577-8)
31. Pokhmurskii V., Dovhunyk V., Student M., Pokhmurska H., Vynar V., Sydorak I. Triboelectrochemical behaviour of arc sprayed coatings on aluminium alloys. *Inzynieria Powierzchni*. 2008, no. 1, pp. 9–13. (In Pol.)

32. Korobov Ju., Boronenkov V. Modeling of liquid metal oxidation at arc metallization // Mathematical modeling and simulation of metal technologies. Int. Conf. MMT-2000, Israel, Ariel, Nov. 13–15, 2000: Proceedings. Israel, Ariel, 2000. P. 683–692.
33. Litovchenko N.N. A three-electrode electric arc metallizing gun – innovation project // Welding International. 2016. T. 30. No. 7. P. 560–562. <http://doi.org/10.1080/09507116.2015.1099893>
34. Теория сварочных процессов / А.В. Коновалов, А.С. Куркин, Э.Л. Макаров и др.; под ред. В.М. Неровного. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 559 с.
35. Павлов А.Ю., Овчинников В.В., Шляпин А.Д. Основы газотермического напыления защитных покрытий. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 300 с.
36. Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., Вахалин В.А. Газотермическое напыление: Учебное пособие для вузов. Москва: Маркет ДС, 2007. 344 с.
37. Бобров Г.В., Ильин А.А. Нанесение неорганических покрытий (теория, технология, оборудование): Учебное пособие для студентов вузов. Москва: Интермет Инжиниринг, 2004. 624 с.
32. Korobov Ju., Boronenkov V. Modeling of liquid metal oxidation at arc metallization. *Mathematical Modeling and Simulation of Metal Technologies. Int. Conf. MMT-2000, Israel, Ariel, Nov. 13-15, 2000: Proceedings.* Israel, Ariel, 2000, pp. 683–692.
33. Litovchenko N.N. A three-electrode electric arc metallizing gun – innovation project. *Welding International.* 2016, vol. 30, no. 7, pp. 560–562. <http://doi.org/10.1080/09507116.2015.1099893>
34. Konovalov A.V., Kurkin A.S., Makarov E.L., etc. *Theory of Welding Processes.* Nerovnyi V.M. ed. Moscow: Izd-vo MSTU im. N.E. Bauman, 2007, 559 p. (In Russ.).
35. Pavlov A.Yu., Ovchinnikov V.V., Shlyapin A.D. *Fundamentals of Gas-Thermal Spraying of Protective Coatings.* Moscow: Vologda: Infra-Inzheneriya, 2020, 300 p. (In Russ.).
36. Baldaev L.Kh., Borisov V.N., Vakhalin V.A. *Gas-Thermal Spraying: Tutorial.* Moscow: Market DS, 2007, 344 p. (In Russ.).
37. Bobrov G.V., Il'in A.A. *Application of Inorganic Coatings (Theory, Technology, Equipment): Tutorial.* Moscow: Intermet Inzhiniring, 2004, 624 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Викторович Коломейченко, д.т.н., профессор, заведующий отделом перспективных технологий, Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»

ORCID: 0000-0002-3865-4486

E-mail: kolom_sasha@inbox.ru

Владимир Николаевич Логачев, к.т.н., доцент кафедры «Надежность и ремонт машин», Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина

E-mail: logvovan@mail.ru

Владислав Борисович Деев, профессор факультета машиностроения и автоматизации, Уханьский текстильный университет; д.т.н., профессор кафедры обработки металлов давлением, главный научный сотрудник лаборатории «Ультрамелкозернистые металлические материалы», Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

ORCID: 0000-0002-8349-8072

E-mail: deev.vb@mail.ru

Наталья Юрьевна Дударева, д.т.н., доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания, Уфимский государственный авиационный технический университет

E-mail: dudareva.nyu@ugatu.ru

Aleksandr V. Kolomeichenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Advanced Technologies, Central Scientific Research and Development Automobile and Engine Institute "NAMI"

ORCID: 0000-0002-3865-4486

E-mail: kolom_sasha@inbox.ru

Vladimir N. Logachev, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Reliability and Repair of Machines, N.V. Parakhin Orel State Agrarian University

E-mail: logvovan@mail.ru

Vladislav B. Deev, Prof. of the Faculty of Machine Engineering and Automation, Wuhan Textile University; Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Metal Forming, Chief Researcher of the Laboratory "Ultrafine-Grained Metal Materials", National University of Science and Technology "MISIS"

ORCID: 0000-0002-8349-8072

E-mail: deev.vb@mail.ru

Natal'ya Yu. Dudareva, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair of Internal Combustion Engines, Ufa State Aviation Technical University

E-mail: dudareva.nyu@ugatu.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

А. В. Коломейченко – формирование основной концепции, цели и задач исследования, подготовка текста статьи, формулирование выводов.

В. Н. Логачев – проведение экспериментов, обработка результатов исследований, доработка текста статьи.

В. Б. Деев – обоснование применяемых методик исследования, анализ результатов исследований, корректировка выводов.

Н. Ю. Дударева – анализ результатов исследований, доработка текста статьи, корректировка выводов.

A. V. Kolomeichenko – formation of the main concept, goals and objectives of the study; writing the text; formation of the conclusions.

V. N. Logachev – conducting experiments, processing of the research results, revision of the text.

V. B. Deev – substantiation of the applied research methods, analysis of the research results, correction of the conclusions.

N. Yu. Dudareva – analysis of the research results, finalization of the text article, correction of the conclusions.

Поступила в редакцию 02.05.2022

После доработки 09.06.2022

Принята к публикации 26.08.2022

Received 02.05.2022

Revised 09.06.2022

Accepted 26.08.2022