

DOI: 10.15593/2224-9877/2016.2.09

УДК 621.793.72+621.785.54

**В.С. Верхорубов¹, С.В. Невежин¹, Ю.С. Коробов¹,
С.Д. Неулыбин², С.А. Терентьев², Ю.Д. Щицын²**

¹Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Fe–C–Cr–Ti–Al ПОСЛЕ ПЛАЗМЕННОГО ОПЛАВЛЕНИЯ

Для защиты узлов и деталей машин оборудования от различных видов изнашивания применяют технологии поверхностной обработки, предназначенные для повышения их служебных характеристик. Для защиты от абразивного износа широко используются напыленные покрытия системы Fe–C–Cr–Ti–Al, однако их ламеллярно-пористая структура приводит к снижению износостойкости, что сужает область их применения. С целью повышения эксплуатационных характеристик покрытий используются различные методы их последующей обработки. В данной работе рассмотрено влияние плазменного оплавления на износостойкость напыленных покрытий из экономнолегированных порошковых проволок системы Fe–C–Cr–Ti–Al в условиях взаимодействия с абразивом. Для нанесения покрытий использовали аппарат активированной дуговой металлизации АДМ-10. Оплавление напыленных покрытий производили на универсальной установке для плазменной обработки материалов, разработанной на кафедре «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета. Обработку осуществляли на токе прямой полярности с использованием аргона в качестве защитного и плазмообразующего газа. Наплавку порошковой проволоки производили неплавящимся электродом в среде аргона. Представлены результаты исследования износостойкости, структуры и химического состава напыленных покрытий до и после плазменного оплавления, а также наплавленного металла из представленных порошковых проволок. Установлено, что в процессе плазменного оплавления, за счет интенсивных раскислительных процессов, произошло значительное изменение химического состава покрытия, что способствовало формированию твердой и трещиностойкой структуры среднеуглеродистого мартенсита. Результаты испытаний по закрепленному абразиву показали повышение износостойкости покрытий после плазменного оплавления в 2,5 раза, что в два раза выше, чем у наплавленного металла.

Ключевые слова: металлизационное покрытие, порошковая проволока, плазменное оплавление, наплавка, структура, износостойкость, химический состав, микротвердость, сжатая дуга, активированная дуговая металлизация, мартенсит.

**V.S. Verkhorubov¹, S.V. Nevezhin¹, Iu.S. Korobov¹,
S.D. Neulybin², S.A. Terent'ev², Iu.D. Shchitsyn²**

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russian Federation

²Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

WEAR RESISTANCE OF ARC SPRAYED COATINGS TYPE OF Fe-C-Cr-Ti-Al AFTER PLASMA REMELTING

For the protection of components and machine parts from various types of wear apply a surface treatment technologies designed for improve their service characteristics. The sprayed coating of Fe-C-Cr-Ti-Al system widely used to protect against abrasive wear, but their lamellar-porous structure leads to decrease in wear resistance, which limits area of their application. In order to improve the performance characteristics of coatings a various methods of their post-treatment are used. In this paper, the effect of plasma remelting (PR) on wear resistance of arc sprayed coatings was examined. Fe-C-Cr-Ti-Al cored wires were used as a feedstock. For coating deposition was used the device of active arc spraying ADM-10. Remelting of sprayed coatings was carried out on the universal installation for plasma treatment of materials, developed by welding department of PNRPU. The plasma treatment was done on a direct current polarity with using argon as a protective and plasma gas. The surfacing of cored wire was carried out by TIG method. Sprayed coatings before and after PR and arc surfaced layer were compared by two-body wear test, chemical composition and structure study. It was found that in the process of PR due to intense oxidative processes, there was a significant change in the chemical composition of the coating, promotes by formation of the medium-martensite structure, having high hardness and fracture toughness. The results by fixed abrasive tests of coatings showed the increase of wear resistance after plasma remelting in 2.5 times.

Keywords: arc-sprayed coating, cored wire, plasma remelting, surfacing, structure, wear resistance, chemical composition, micro-hardness, compressed arc, activ arc spraying, martensite.

Для повышения ресурса узлов оборудования, работающих в условиях абразивного изнашивания, эффективно применяются напыленные покрытия из порошковых проволок системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Al [1, 2]. Однако наличие пор и слоистой структуры металлизационных покрытий приводит к снижению их износостойкости [3, 4], а достаточно низкая адгезия покрытия (20–35 МПа) в условиях эксплуатации может привести к отслоению. С целью улучшения характеристик напыленных покрытий их подвергают последующему оплавлению концентрированными источниками нагрева [5–9]. По параметрам стоимости, мобильности и универсальности оборудования наиболее перспективным источником является сжатая (плазменная) дуга [10].

Целью исследования было определение влияния плазменного оплавления на абразивную износостойкость покрытий, полученных методом активированной дуговой металлизации из порошковых проволок системы легирования Fe-C-Cr-Ti-Al.

В качестве основы для нанесения покрытий были использованы пластины из качественной стали 40 размерами 240×70×10. Напыляемый материал – порошковая проволока марки ППМ-8 (80X22Т2Ю2) диаметром 2 мм.

Перед нанесением покрытия производили дробеструйную обработку поверхности подложки.

Для нанесения покрытий толщиной 1,7–2 мм использовали аппарат активированной дуговой металлизации АДМ-10 [11, 12]. Напыление производили под прямым углом к поверхности изделия, на параметрах, представленных ниже.

Параметры режима активированной дуговой металлизации:

Ток, А	Напряжение, В	Скорость напыления, м/мин	Дистанция напыления, мм	Давление воздуха, МПа	Давление пропана, МПа
200	28	6	100	0,30	0,32

Плазменное оплавление металлизационного покрытия осуществляли на оборудовании, разработанном на кафедре «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета [13]. В качестве защитного и плазмообразующего газа использовали аргон. Параметры режима плазменной обработки приведены ниже.

Параметры режима плазменного оплавления:

Ток, А	Диаметр сопла, мм	Скорость обработки, м/ч	Дистанция обработки, мм	Расход плазмообразующего газа, л/мин	Расход защитного газа, л/мин
160	4	6	5	2,5	4,5

Наплавку используемой порошковой проволоки выполняли неплавящимся электродом в среде аргона. Режимы наплавки – ток 170 А, напряжение 34 В. Наплавку слоев выполняли непрерывно, в один слой.

Из пластины с нанесенным металлизационным покрытием, до и после плазменного оплавления, с помощью электроэрозионного проволочно-вырезного станка AGIE CHARMILLES CUT 20 были вырезаны образцы размерами 10×10×10 мм.

Микроструктурные исследования выполнены на металлографическом микроскопе «ЛабoМет-3» и сканирующем электронном микроско-

пе VEGA II XMU, химический состав с поверхности покрытий определяли фотоэлектрическим спектральным методом по ГОСТ 18895–97, микротвердость по сечению покрытий измеряли на микротвердомере Shimadzu HNMV-G21DT под нагрузкой 0,5 Н (50 гс) и 3 Н (300 гс), фазовый состав покрытий определяли на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance в $\text{Cr-}k_{\alpha}$ -излучении.

Износостойкость определяли путем совершения возвратно-поступательных движений поверхности образцов по шлифовальной шкурке по ГОСТ 6456–82. Путь трения образца за одно испытание при скорости движения 0,158 м/с устанавливали равным 60 м. Нормальная удельная нагрузка на образец 1 МПа. Длина одного рабочего хода образцов 0,125 м, шаг образца за один рабочий ход 0,0012 м.

Металлизационное покрытие имеет слоистую структуру (рис. 1, а), характерную для напыленных покрытий. Толщина покрытия составляет 1840 мкм. Видно, что покрытие характеризуется значительной неоднородностью структуры, наличием пор и несплошностей.

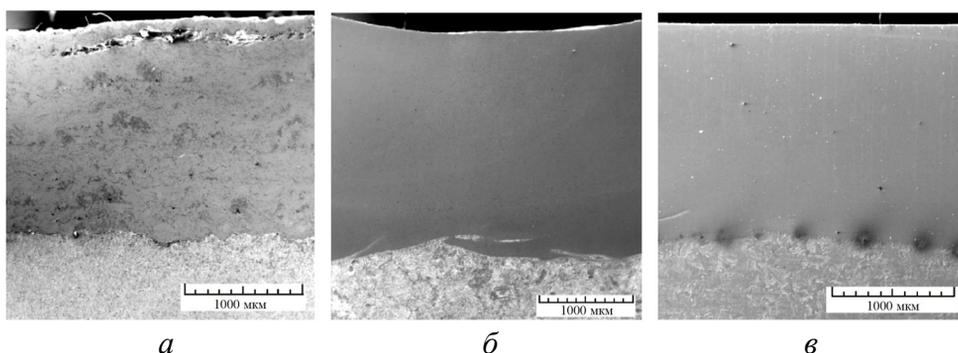


Рис. 1. Макроструктура образцов: а – напыленное покрытие; б – покрытие после плазменного оплавления; в – наплавленного слоя

Плазменная поверхностная обработка напыленного покрытия привела к его полному переплаву и устранению структурных неоднородностей (рис. 1, б). Толщина переплавленного покрытия составляет 2380 мкм. Следовательно, по изменению толщины покрытия смещение с основой после плазменного оплавления составляет примерно 30 %. Оплавленное покрытие имеет однородную структуру, в которой отсутствуют оксидные фазы, в большом количестве имевшиеся в исходном напыленном покрытии.

Наплавленный металл имеет структуру без видимых границ между слоями (рис. 1, *в*). Толщина слоя составляет 1,75 мм. Наплавка характеризуется отсутствием крупных пор и несплошностей.

Покрытие представляет собой тонкие чередующиеся волнообразные прослойки белого, серого и черного цветов, различной величины и конфигурации (рис. 2, *а*). Очевидно, что участки темно-серого и черного цветов являются оксидными прослойками. Металлические фрагменты белого цвета представляют собой твердый раствор хрома в аустените и мартенсите с большим содержанием легирующих элементов. В наиболее крупных частицах покрытия наблюдается структура точечного характера, похожая на отпущенный мартенсит с включениями дисперсных карбидов.

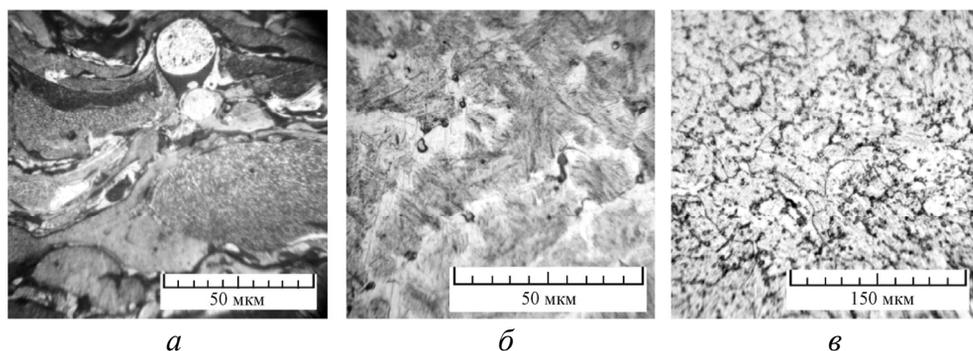


Рис. 2. Микроструктура образцов: *а* – напыленное покрытие; *б* – покрытие после плазменного оплавления; *в* – наплавленного слоя

Переплавленное покрытие имеет дендритное строение и состоит из мартенсита с выделением дисперсных карбидов (рис. 2, *б*). Форма и размеры зерна по толщине оплавленного слоя сильно меняются, что объясняется особенностями теплоотвода от расплавленного покрытия в основу с большим коэффициентом теплопроводности [14, 15].

Наплавленный металл имеет характерную ячеистую феррито-мартенситную структуру с выделившимися по границам зерен крупными частицами упрочняющих фаз (рис. 2, *в*).

Рентгеноструктурный анализ полученных покрытий показал, что единственной надежно регистрируемой фазой всех покрытий является твердый раствор на основе α -железа. Других фаз на дифрактограммах не выявлено, вероятно, вследствие их малого количества в покрытиях.

Результаты спектрального анализа с поверхности образцов (табл. 1) показали, что в процессе напыления практически не происходит выгорания легирующих элементов. Самое высокое содержание легирующих элементов наблюдается в напыленном покрытии. Содержание легирующих элементов в наплавленном слое в среднем в два раза меньше, чем в напыленном, что объясняется частичным выгоранием элементов, а также интенсивным смешением с основным металлом в процессе наплавки. Наименьшее содержание легирующих элементов наблюдается в напыленном покрытии после плазменного оплавления. Плазменное оплавление привело к полному исчезновению алюминия и титана, а также к сокращению содержания хрома и углерода в два раза. Такое резкое снижение концентрации легирующих элементов после плазменного оплавления объясняется несколькими процессами. Присутствующие в напыленном покрытии оксиды Ti и Al, вследствие их нерастворимости в расплавленном металле, в процессе плазменного оплавления всплывают в шлак. Карбиды Ti, а также Ti и Al, растворенные в металлической матрице покрытия, также окисляются при взаимодействии с кислородом из пор и оксидов и уходят в шлак. Основными причинами снижения концентрации C и Cr, вероятно, являются смешение с основным металлом и выгорание, что подтверждается химическим анализом однослойной наплавки (см. табл. 1).

Таблица 1

Химический состав покрытий

Тип покрытия	Содержание элемента, мас. %			
	C	Cr	Al	Ti
АДМ-покрытие	0,77	20,04	2,18	1,56
Оплавленное покрытие	0,37	8,91	0,01	0,01
Наплавка в 1 слой	0,50	10,69	0,75	0,99

Наиболее высоким уровнем микротвердости, несмотря на низкое содержание легирующих элементов, характеризуется напыленное АДМ-покрытие после плазменной обработки, а наименьшим – исходное покрытие (табл. 2). Плазменная обработка привела к переплавлению данного покрытия, способствовала устранению пористости и оксидных фаз, что обеспечило более равномерное распределение хи-

мических элементов и структурных составляющих в покрытии. Присутствующие в напыленном покрытии Ti и Al при плазменном оплавлении выступили в роли раскислителя и вышли в шлак. Высокие скорости охлаждения при плазменной обработке обуславливают образование структуры среднеуглеродистого мартенсита с включениями дисперсных карбидов хрома, что привело к значительному повышению микротвердости напыленного покрытия. Пониженная твердость наплавки объясняется образованием феррито-мартенситной структуры за счет наличия в ней сильных ферритизаторов – Cr и Al, а также высокого содержания Ti, обуславливающего обеднение металлической матрицы углеродом при образовании карбидов.

Таблица 2

Средняя микротвердость покрытий по сечению

Тип покрытия	Микротвердость	
	HV0,05	HV0,3
АДМ-покрытие	460 ± 64	487 ± 50
АДМ-покрытие после плазменного оплавления	831 ± 18	753 ± 14
Наплавка	576 ± 18	571 ± 11

По результатам определения потерь массы образцов после испытаний износостойкости по закрепленному абразиву наибольшую износостойкость имеет покрытие после плазменного оплавления (0,1444 г), а наименьшую – исходное металлизационное покрытие (0,3738 г), при этом износостойкость оплавленного покрытия на 85 % выше износостойкости наплавки (0,2660 г) (рис. 3).

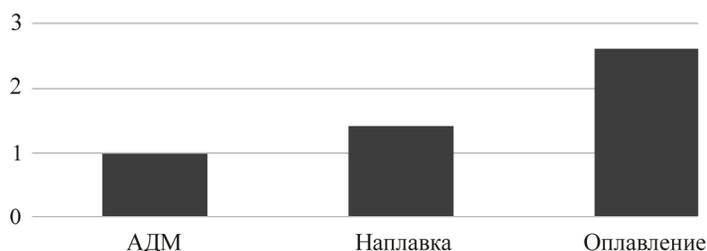


Рис. 3. Относительная износостойкость различных видов покрытий

В условиях абразивного износа высокая износостойкость более однородных оплавленных покрытий с равномерным распределением дисперсных упрочняющих фаз в сравнении с металлизационными покрытиями до оплавления может быть связана с ускоренным микрорезанием последних при попадании абразивных частиц в относительно мягкие пограничные слои и поры.

В то же время при однослойной наплавке образуется феррито-мартенситная структура с выделением карбидов хрома и титана по границам зерен, обуславливающая снижение твердости и износостойкости покрытия.

Рис. 4, *а* показывает, что изнашивание напыленного покрытия происходит преимущественно по механизму царапания (пластического оттеснения). Об этом свидетельствует присутствие на поверхностях рассматриваемых покрытий наряду с отдельными однонаправленными впадинами и выступами, связанными с отделением микростружки, выглаженных участков, следов передеформирования металла и большого количества усталостных микротрещин, вызванных развитием малоциклового фрикционной усталости. Помимо глубоких царапин наблюдается также отслоение фрагментов покрытия, что говорит о их низкой когезионной прочности, связанной с образованием оксидных прослоек на межламельных границах. Таким образом, абразивное изнашивание покрытия, полученного методом АДМ, происходит по смешанному механизму царапания и отслоения.

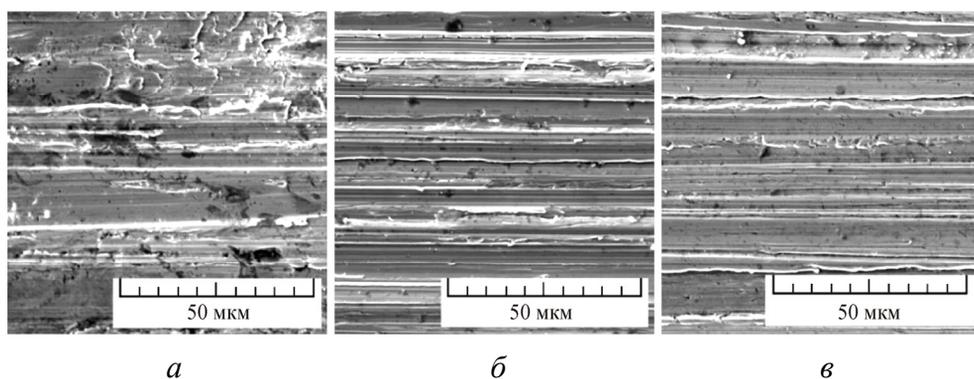


Рис. 4. Поверхности износа: *а* – напыленное АДМ-покрытие; *б* – покрытие после плазменного оплавления; *в* – наплавленный металл

Изнашивание напыленного покрытия с последующим плазменным оплавлением и наплавленного металла происходит по механизму микрорезания, реализующегося в процессе одноактного отделения микрообъема металла от поверхности покрытия под воздействием абразивного зерна. На это указывает наличие на поверхностях изнашивания обеих покрытий характерных следов микрорезания в виде борозд и отвалов с острыми краями, ориентированных в направлении движения абразивных зерен (рис. 4, б, в). Развитие механизма микрорезания свидетельствует о том, что твердость использованного абразива более чем в 1,3 раза превышает твердость структурных составляющих оплавленного покрытия и наплавленного слоя.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Плазменная обработка металлизационного покрытия системы Fe–Cr–C–Ti–Al приводит к его полному переплавлению и изменению структуры от ламеллярно-пористой до монолитной. В результате быстрой кристаллизации оплавленного покрытия и изменения его химического состава образуется структура среднеуглеродистого мартенсита с включениями дисперсных карбидов хрома.

2. Установлено, что плазменное оплавление металлизационного покрытия привело к повышению его твердости в 1,5 раза, а износостойкости в 2,5 раза. Вероятно, это связано с ламеллярно-пористой структурой напыленного покрытия, обуславливающей смешанный механизм износа, характеризующийся процессами царапания и отслоения участков покрытия с низкой когезионной прочностью, при попадании абразивных частиц в пограничные слои и поры покрытия.

3. Пониженная твердость и износостойкость наплавленных слоев обуславливается формированием феррито-мартенситной структуры, обладающей меньшей твердостью, чем мартенситная структура оплавленных покрытий.

Список литературы

1. Структура и износостойкость напыленных покрытий системы Fe–Cr–C–Ti с метастабильным аустенитом / Ю.С. Коробов, В.И. Шумяков, М.А. Филиппов [и др.] // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы III Междунар. интерактив. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2013. – С. 100–104.

2. Экономнолегированная порошковая проволока для повышения ресурса эксплуатации плунжеров гидропрессов методом дуговой металлизации / Г.А. Ример, В.С. Верхорубов, С.В. Неужин, Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов // Сварка и диагностика: сб. докл. науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2014. – С. 105–111.

3. Wear performance of thermally sprayed and welded coatings / C.R.C. Lima, B.V. Bette, F. Camargo, H.C. Fals, V.A. Ferraresi // Using Conventional and Nanostructured Materials. Proc. of ITSC 2013. ASM International. – Busan, 2013. – P. 424–428.

4. Утенков В.М., Зайцев А.Н. Исследование триботехнических характеристик перспективных износостойких плазменных покрытий при трении скольжения без смазки // Известия вузов. Машиностроение. – 2013. – № 11. – С. 81–89.

5. Исследование структуры и свойств никелевых порошковых покрытий после оплавления / В.А. Клеменов, В.Е. Панин, В.П. Безбородов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 1997. – № 6. – С. 68–75.

6. Спиридонов Н.В., Кардаполова М.А., Девойно О.Г. Влияние лазерного нагрева на износостойкость композиционных покрытий // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 1. – С. 60–65.

7. Pokhmurs'ka H., Chervins'ka N., Student M., Zadorozhna Kh. Effect of the laser fusion of electrometallized coatings of the Fe–Cr–B–Al system on their corrosion resistance // Materials Science. – 2006. – Vol. 42, № 6. – P. 837–842.

8. Pokhmurs'ka H.V., Dohunyk V.M., Student M.M. Wear resistance of laser-modified arc-sprayed coatings made of FMI-2 powder wires // Materials Science. – 2003. – Vol. 39, № 4. – P. 533–538.

9. Influence of plasma remelting on the microstructure and cavitation resistance of arc-sprayed Fe–Mn–Cr–Si alloy / A.G.M. Pukasiewicz, P.R.C.Jr. Alcover, A.R. Capra, R.S.C. Paredes // Journal of Thermal Spray Technology. – 2014. – Vol. 23(1–2). – P. 51–59.

10. Щицын Ю.Д. Плазменные технологии в сварочном производстве / Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2004. – Ч. 1. – 73 с.

11. Коробов Ю.С. Эффективность применения активированной дуговой металлизации для нанесения защитных покрытий // Сварочное производство. – 2005. – № 2. – С. 47–49.

12. Структура и свойства покрытий из стали 40X13, полученных с использованием различных методов газотермического напыления / П.А. Витязь, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко. [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2002. – № 5. – С. 29–36.

13. Плазменная закалка тяжело нагруженных деталей из стали 40X13 / Д.С. Белинин, В.С. Верхорубов, П.С. Кучев, Н.Н. Струков, Ю.Д. Щицын // Вестник Пермского государственного технического университета. Машиностроение и материаловедение. – 2011. – Т. 13, № 3. – С. 12–18.

14. Структура напыленных покрытий типа Fe–Cr–Ti–Al после плазменного оплавления / В.С. Верхорубов, Ю.С. Коробов, М.А. Филиппов, Ю.Д. Щицын, С.В. Невежин, С.Д. Неулыбин // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2015. – Т. 17, № 2. – С. 217–223.

15. Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: учебник для вузов. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2011. – 643 с.

References

1. Korobov Iu.S., Shumiakov V.I., Filippov M.A. [et al.]. Struktura i iznosostoičnost' napylennykh pokrytii sistemy Fe–Cr–C–Ti s metastabil'nym austenitom [Structure and wear resistance of the raised dust Fe–Cr–C–Ti system coverings with metastable austenite]. *Materialy III Mezhdunarodnoi interaktivnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Innovatsii v materialovedenii i metallurgii"*. Ekaterinburg: Ural'skii universitet, 2013, pp. 100-104.

2. Rimer G.A., Verkhorubov V.S., Nevezhin S.V., Korobov Iu.S., Filippov M.A. Ekonomnolegirovannaia poroshkovaia provoloka dlia povysheniia resursa ekspluatatsii plunzherov gidroptressov metodom dugovoi metallizatsii [The Ekonomnolegirovanny powder wire for increase of a resource of operation of plungers of gidroptress by method of arc metallization]. *Sbornik dokladov nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Svarka i diagnostika"*. Ekaterinburg, 2014, pp. 105-111.

3. Lima C.R.C., Bette B.V., Camargo F., Fals H.C., Ferraresi V.A. Wear performance of thermally sprayed and welded coatings. *Using Conventional and Nanostructured Materials. Proc. of ITSC, 2013. ASM International*. Busan, 2013, pp. 424-428.

4. Utenkov V.M., Zaitsev A.N. Issledovanie tribotekhnicheskikh kharakteristik perspektivnykh iznosostoičnikh plazmennykh pokrytii pri

trenii skol'zheniia bez smazki [Research of tribotechnical characteristics of perspective wearproof plasma coverings at a sliding friction without greasing]. *Izvestiia vuzov. Mashinostroenie*, 2013, no. 11, pp. 81-89.

5. Klemenov V.A., Panin V.E., Bezborodov V.P. [et al.]. Issledovanie struktury i svoistv nikelovykh poroshkovykh pokrytii posle oplavleniia [Research of structure and properties of nickel powder coverings after an oplavleniye]. *Fizika i khimiia obrabotki materialov*, 1997, no. 6, pp. 68-75.

6. Spiridonov N.V., Kardapolova M.A., Devoino O.G. Vliianie lazernogo nagreva na iznosostoikost' kompozitsionnykh pokrytii [Influence of laser heating on wear resistance of composite coverings]. *Trenie i iznos*, 1988, vol. 9, no. 1, pp. 60-65.

7. Pokhmurs'ka H., Chervins'ka N., Student M., Zadorozhna Kh. Effect of the laser fusion of electrometallized coatings of the Fe-Cr-B-Al system on their corrosion resistance. *Materials Science*, 2006, vol. 42, no. 6, pp. 837-842.

8. Pokhmurs'ka H.V., Dovhunyuk V.M., Student M.M. Wear resistance of laser-modified arc-sprayed coatings made of FMI-2 powder wires. *Materials Science*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 533-538.

9. Pukasiewicz A.G.M., Alcover P.R.C. Jr., Capra A.R., Paredes R.S.C. Influence of plasma remelting on the microstructure and cavitation resistance of arc-sprayed Fe-Mn-Cr-Si Alloy. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2014, vol. 23(1-2), pp. 51-59.

10. Shchitsyn Iu.D. Plazmennye tekhnologii v svarochnom proizvodstve [Plasma technologies in welding production]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2004. Part 1. 73 p.

11. Korobov Iu.S. Effektivnost' primeneniia aktivirovannoi dugovoi metallizatsii dlia naneseniia zashchitnykh pokrytii [Efficiency of application of the activated arc metallization for drawing sheetings]. *Svarochnoe proizvodstvo*, 2005, no. 2, pp. 47-49.

12. Vitiaz' P.A., Belotserkovskii M.A., Kukareko V.A. [et al.]. Struktura i svoistva pokrytii iz stali 40Kh13, poluchennykh s ispol'zovaniem razlichnykh metodov gazotermicheskogo napyleniia [Structure and properties of the coverings from steel 40X13 received with use of various methods of a gas-thermal dusting]. *Fizicheskaiia mezomekhanika*, 2002, no. 5, pp. 29-36.

13. Belinin D.S., Verkhorubov V.S., Kuchev P.S., Strukov N.N., Shchitsyn Iu.D. Plazmennaiia zakalka tiazhelonagruzhenykh detalei iz stali

40Kh13 [Plasma training of heavy-duty details from steel 40X13]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie i materialovedenie*, 2011, vol. 13, no. 3, pp. 12-18.

14. Verkhorubov V.S., Korobov Iu.S., Filippov M.A., Shchitsyn Iu.D., Nevezhin S.V., Neulybin S.D. Struktura napylennykh pokrytii tipa Fe–C–Cr–Ti–Al posle plazmennogo oplavleniia [Structure of the raised dust Fe-C-Cr-Ti-Al coverings after a plasma oplavleniye]. *Izvestiia Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2015, vol. 17, no. 2, pp. 217-223.

15. Guliaev A.P., Guliaev A.A. Metallovedenie [Metallurgical science]. Moscow: Al'ianS, 2011. 643 p.

Получено 22.03.2016

Об авторах

Верхорубов Вадим Сергеевич (Екатеринбург, Россия) – ассистент кафедры «Технология сварочного производства» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: v.verkhorubov@mail.ru.

Невежин Станислав Владимирович (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Технология сварочного производства» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: snevezhin@gmail.com.

Коробов Юрий Станиславович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Технология сварочного производства» Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина; e-mail: yukorobov@gmail.com.

Неулыбин Сергей Дмитриевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Терентьев Сергей Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

Щицын Юрий Дмитриевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сварочное производст-

во и технология конструкционных материалов» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: svarka@pstu.ru.

About the authors

Vadim S. Verkhorubov (Ekaterinburg, Russian Federation) – Assistant, Department of Welding Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: v.verkhorubov@mail.ru.

Stanislav V. Nevezhin (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences Assistant, Department of Welding Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: snevezhin@gmail.com.

Iurii S. Korobov (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of Department of Welding Technology, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin; e-mail: yukorobov@gmail.com.

Sergei D. Neulybin (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: sn-1991@mail.ru.

Sergei A. Terent'ev (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.

Iurii D. Shchitsyn (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Welding Production and Structural Materials Technology, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: svarka@pstu.ru.