

Использование современных ресурсосберегающих методов при изготовлении и ремонте деталей на примере электроискрового легирования (ЭИЛ)

В. И. Иванов ¹ ✉, В. А. Денисов ¹, Д. А. Игнатьков ²

¹ ФГБНУ ФНАЦ ВИМ

1-й Институтский проезд, д. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² Белорусский государственный аграрный технический университет

проспект Независимости, 99, г. Минск, 220023, Республика Беларусь

✉ e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Резюме

Работа посвящена универсальному ресурсосберегающему методу обработки деталей – электроискровому легированию (ЭИЛ), используемому как при изготовлении, так и при ремонте деталей. Этот метод позволяет наносить упрочняющие и восстанавливающие покрытия на различные объекты (детали, инструменты, технологическую оснастку) независимо от их форм и размеров.

Цель исследования: примерами практического применения метода ЭИЛ показать высокую универсальность и эффективность его для решения задач машиностроительного и ремонтного производства.

Методы. Работа аналитическая, выполнена с учетом практического опыта авторов.

Результаты. Приведены краткие сведения о методе ЭИЛ, механизме формирования покрытий, их толщине и свойствах. При реализации упрочняющих технологий износостойкость повышается в 2-5 раз и более нанесением покрытий повышенной твердости с использованием электродов из металло-керамических твердых сплавов на основе карбидов TiC, WC и других твердых соединений. Показана целесообразность восстанавливающих ЭИ технологий: износ большинства деталей (около 85 %) агрегатов различной техники не превышает 200 мкм, а себестоимость восстановления их обычно составляет не более 25-30 % от стоимости новой детали; ресурс восстановленных деталей соизмерим или превышает ресурс новых деталей. Описаны на конкретных примерах упрочняющие и восстанавливающие технологии.

Заключение. Приведенные примеры практического применения метода ЭИЛ подтверждают положение о высокой универсальности и эффективности этого метода для решения задач машиностроительного и ремонтного производства. Полученные результаты могут быть использованы при выборе метода упрочнения или восстановления различных объектов из металлов и сплавов (детали машин, инструменты, технологическую оснастку) с учетом достоинств ЭИЛ.

Ключевые слова: электроискровое легирование; упрочнение; восстановление; деталь; покрытие; эффективность.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Иванов В. И., Денисов В. А., Игнатков Д. А. Использование современных ресурсосберегающих методов при изготовлении и ремонте деталей на примере электроискрового легирования (ЭИЛ) // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019; 23(6): 8-20. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-8-20>.

Поступила в редакцию 07.10.2019

Подписана в печать 26.11.2019

Опубликована 23.12.2019

Use of Modern Resource-Saving Methods in Parts' Manufacturing and Repairing on the Example of Electric Spark Alloying (ESA)

Valery I. Ivanov ¹ ✉, Vyacheslav A. Denisov ¹, Dmitry A. Ignatkov ²

¹ Federal State Budgetary Institution Scientific Center for Scientific and Applied Mathematics, VIM
1st Institutsky passage 5, Moscow 109428, Russian Federation

² Belarusian State Agrarian Technical University
Independence Avenue 99, Minsk 220023, Republic of Belarus

✉ e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Abstract

The work is devoted to a universal resource-saving method of parts processing - electric spark alloying (ESA). It is used both in manufacturing and repairing. This method allows you to apply reinforced and restored coatings to various objects (parts, tools, and tooling) regardless of their shapes and sizes.

Purpose of research is to show high universality and efficiency of ESA method on the examples of its practical application for problem solving of machine-building production and repair.

Methods. The work is analytical and carried out taking into account authors' practical experience.

Results. Some information about ESA method, coating forming mechanism, their thickness and properties is given. Implementing strengthening technologies wear resistance is increased by 2-5 times and more by coatings of increased hardness using electrodes from metal-ceramic hard alloys based on carbides of TiC, WC and other hard compounds. The expediency of recovery technologies is shown: wear of most parts (about 85%) of various techniques does not exceed 200 μm and their recovery cost is usually no more than 25-30% of a new part cost; recovered parts resource is commensurate or exceeds new parts resource. Adjusting and restoring technologies are described using specific examples.

Conclusion. Given examples of practical application of ESA method confirm high universality and efficiency of this method for solving machine-building and repair production problems. Obtained results can be used in method selecting for strengthening or reducing of various objects from metals and alloys (parts of machines, tools, technological equipment) taking into account ESA advantages.

Keywords: electric spark alloying; hardening; restoration; detail; covering, efficiency.

Conflict of interest. The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Ivanov V. I., Denisov V. A., Ignatkov D. A. Use of Modern Resource-Saving Methods in Parts' Manufacturing and Repairing on the Example of Electric Spark Alloying (ESA). *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* = *Proceedings of the Southwest State University*. 2019, 23(6): 8-20 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2019-23-6-8-20>.

Received 07.10.2019

Accepted 26.11.2019

Published 23.12.2019

Введение

Современное промышленное производство основано на использовании различной техники для выполнения операций технологического процесса при изготовлении деталей или их восстановлении. Увеличение срока службы этой техники, повышение ее надежности способствуют бесперебойности производственного процесса и сокращению его затрат. Уменьшение затрат на техническое обеспечение техники связано также с рациональным ремонтом ее и применением при этом эффективных методов восстановления размеров изношенных деталей. Также важным для потребителя является стоимость этой техники. Снижение ее может достигаться повышением эффективности машиностроительного производства, что в значительной степени зависит от качества инструментов, штампов и пресс-форм, используемых при изготовлении отдельных деталей.

В связи с указанным становятся особо востребованными универсальные ресурсосберегающие методы как для применения при изготовлении, так и при ремонте деталей. К таким методам с полным основанием можно отнести электроискровое легирование (ЭИЛ). Этот метод известен с 1940-х годов [1], за более чем 70-летний период накоплен большой практический опыт его применения, во многих технически развитых странах продолжают его ис-

следования в направлении совершенствования оборудования, технологий и электродных материалов [2-11].

Цель данной работы – примерами практического применения метода ЭИЛ показать высокую универсальность и эффективность его для решения задач машиностроительного и ремонтного производства.

Материалы и методы

Ниже приведены результаты аналитической работы, выполненной с учетом практического опыта авторов.

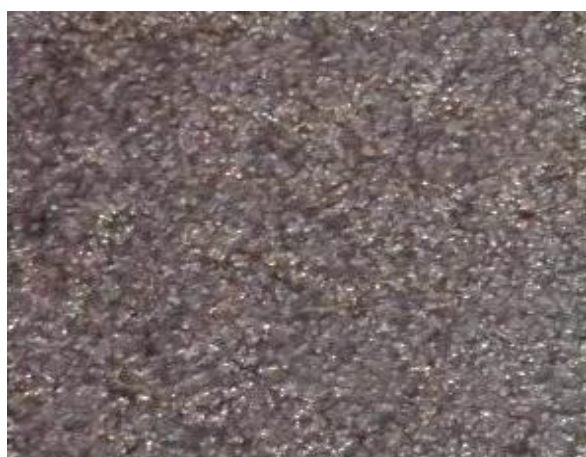
Результаты и их обсуждение

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ) – развивает методы, направленные на увеличение ресурса и восстановление работоспособности деталей машин, рабочих органов и инструментов, включая ЭИЛ. Этот метод отличается высокой универсальностью и позволяет наносить упрочняющие и восстанавливающие покрытия на различные объекты (детали, инструменты, технологическую оснастку) независимо от их форм и размеров.

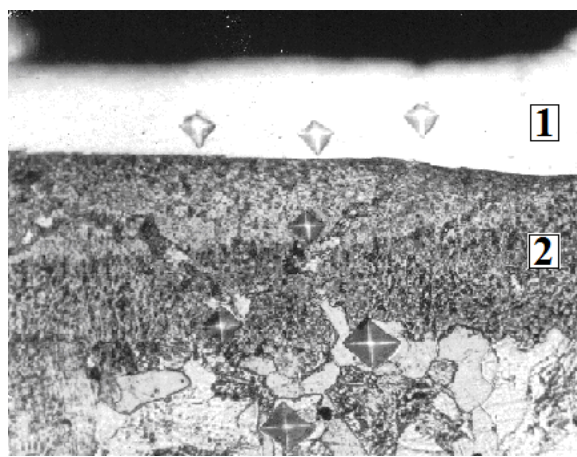
При использовании ЭИЛ токопроводящий материал детали подвергается многократному воздействию электрическими разрядами, параметры которых (энергия, длительность и частота) регулируются в широких пределах, соответ-

ственно, $0,01 \dots 10$ Дж, $10 \dots 2000$ мкс, $10 \dots 2000$ Гц. При этом плотность мощности энергии в пятне достигает $10^6 \dots 10^9$ Вт/мм², что равно или превышает аналогичный показатель лазерного луча - $1 \cdot 10^6$ Вт/мм², а температура плазмы искрового разряда может достигать 20000 К [12]. При каждом разряде происходит полярный перенос элементов материала электрода – анода на деталь – катод, в качестве которых могут служить практически все токопроводящие материалы. В результате импульсного воздействия и микрометаллургических процессов поверхность материала детали приобретает новый характерный рельеф, образуется измененный поверхностный слой, состоящий из элементов

материала анода и катода, а также межэлектродной газовой среды. Толщина нанесенного слоя обычно составляет $5 \dots 1000$ мкм, она зависит от электрических параметров процесса и материала электрода; использование технологического приема согласно [13] позволяет значительно, в 6-8 раз и более повысить толщину покрытия. Свойства нового слоя определяются материалом анода, поэтому нанесенные покрытия могут обладать улучшенными по отношению к исходному материалу детали свойствами – повышенными износо-, жаро-, коррозионной стойкостью и др. На рис. 1 приведены фотографии рельефа поверхности и измененного поверхностно слоя после обработки методом ЭИЛ.



а (1:1)



б (x480)

Рис. 1. Вид поверхности (а) и характерный вид структуры (б) измененного поверхностного слоя стали (1 – белый слой; 2 – переходный слой, ниже – основа) после ЭИЛ

Fig. 1. Type of surface (a) and characteristic type of structure (b) of the changed surface layer of steel (1 – white layer; 2 – transition layer, below - base) after ESA

Этот метод обладает рядом достоинств. Приведем некоторые из них: не требуется сложная предварительная подготовка поверхности детали – катода; достигается высокая прочность сцепле-

ния покрытия с основным металлом; отсутствуют перегрев детали и ее коробление в результате обработки; имеется возможность применения в качестве электродов практически всех токо-

проводящих материалов; стоимость оборудования относительно невысокая, оно обладает надежностью, ремонтно-пригодностью и мобильностью; метод отличается простотой и несложностью обучения приемам работы обслуживающего персонала.

Наряду с другими российскими и зарубежными научными центрами, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ выполняет исследования процесса ЭИЛ, кинетики формирования покрытий и их свойств, наноструктурирования поверхностных слоев, которые направлены на повышение эффективности метода ЭИЛ.

Приведем примеры эффективного применения метода ЭИЛ и технологические особенности обработки при решении разных задач.

Упрочняющие технологии направлены на увеличение износостойкости рабочих поверхностей деталей, рабочих органов типа ножей, а также режущих инструментов и штамповой оснастки для их изготовления. Износостойкость повышается в 2-5 раз и более. Эффект достигается нанесением покрытий повышенной твердости с использованием электродов из металлокерамических твердых сплавов на основе карбидов TiC, WC и других твердых соединений. Вместе с тем, дополнительная обработка нанесенного твердосплавного покрытия медным электродом способствует заметному улучшению положительного результата. Это эффективно в случаях, когда необходимо придать покрытию свойства теплопроводника для

рассеивания по рабочей поверхности тепла, образующегося при механической обработке металлических материалов. Наиболее эффективны упрочняющие технологии для увеличения износостойкости сложнопрофильного многолезвийного режущего инструмента, а также штамповой оснастки. Обычно после нанесения упрочняющих покрытий на детали машин выполняется последующая механическая обработка (шлифование, поверхностно-пластическое деформирование в виде алмазного выглаживания или обкатки роликом или шариком, притирка по сопряженной детали. Выполнение такой обработки после ЭИЛ рабочих органов, режущих инструментов и штампов не требуется.

На рис. 2 показаны некоторые объекты упрочняющей обработки методом ЭИЛ как для машиностроительного производства для агропромышленного комплекса (режущие инструменты, штампы), так и изделий этого производства (лапы культиватора, шестерни синхронизатора). Виден широкий диапазон применения упрочняющих электроискровых технологий для улучшения технического обеспечения промышленных предприятий.

Восстанавливающие ЭИ технологии позволяют вернуть для дальнейшего использования детали, утратившие в процессе эксплуатации размеры рабочих поверхностей или имеющие локальные дефекты. Это во многих случаях целесообразно, так как износ большинства деталей (около 85 %) агрегатов

различной техники, к примеру, применяемой в агропромышленном комплексе, не превышает 200 мкм, а себестоимость восстановления их обычно со-

ставляет не более 25-30 % от стоимости новой детали; ресурс восстановленных деталей соизмерим, а в некоторых случаях превышает ресурс новых деталей.

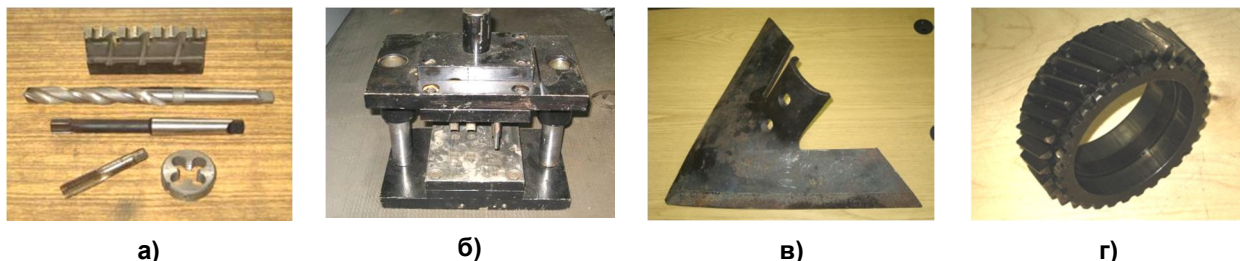


Рис. 2. Примеры объектов упрочнения: **а** – режущие инструменты; **б** – разделительный штамп; **в** – лапа культиватора; **г** – шестерня синхронизатора

Fig. 2. Examples of hardening objects: **a** – cutting tools; **b** – separation stamp; **v** – paw; cultivator; **r** – gear synchronizer

Поэтому восстановление изношенных деталей взамен приобретения новых способствует значительной экономии энергетических, материальных и трудовых ресурсов, снижает экологическую нагрузку на природную среду.

Метод ЭИЛ обладает достаточно большим технологическим диапазоном, что позволяет наносить покрытия раз-

ной толщины. На рис. 3 приведены в качестве примера предельные значения толщины покрытий разными электродными материалами, наносимыми на современной высоко универсальной установке «БИГ-5», что подтверждает возможность использования этого метода в ремонтных целях

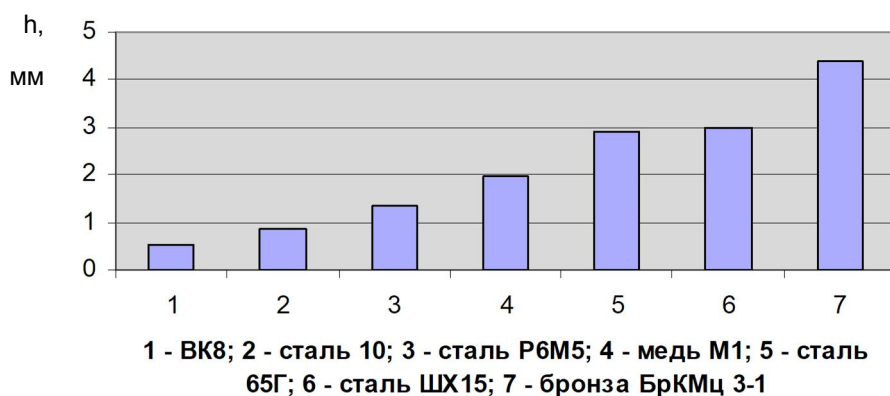


Рис. 3. Максимальная толщина покрытий на установке «БИГ-5» (на стали 45)

Fig. 3. Maximum thickness of coatings on the installation "BIG-5"(on steel 45)

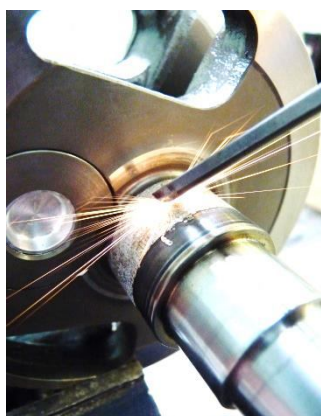
Выбор электродных материалов для нанесения покрытий выполняют с учетом условий работы упрочняемой или восстанавливаемой поверхности. При работе ее в неподвижном соединении

достаточно использования электродов из конструкционных сталей. Усложнение условий работы восстанавливаемой поверхности (трение скольжения, повышенные температуры, наличие агрес-

сивной среды) требует применения электродов из легированных сталей и сплавов, содержащих элементы, препятствующие воздействию агрессивных факторов: Cr, Ni, W, Mo, Si и другие. Электрические режимы обработки ме-

тодом ЭИЛ назначаются в зависимости от требуемой толщины покрытия.

Наибольшее применение метод ЭИЛ нашел при восстановлении наружных и внутренних посадочных поверхностей под подшипники валов, осей и корпусных деталей (рис. 4) [3].



а)



б)

Рис. 4. Нанесение покрытий на детали типа «вал» (а) и «корпус» (б)

Fig. 4. Coating on parts of the "shaft" type (a) and "housing" (b)

Установлено, что для обеспечения надежной работы на уровне 100 %-ного ресурса соединений «вал – подшипник» или «корпус – подшипник» достаточно опорной площади восстановленной поверхности не менее 55-60 %. Эффективность восстановления таких поверхностей иллюстрируют данные табл. 1 [14].

Особенность этих технологий заключается в нанесении на изношенные поверхности покрытий под номинальный размер или с минимальным припуском для последующей механической обработки. При отсутствии жестких требований по шероховатости поверхности последующая механическая обработка не выполняется.

Таблица 1. Сравнительные стоимостные данные по ряду изделий, тыс. руб.

Table 1. Comparative cost data for a number of products, thousand rubles

№ п/п	Наименование	Затраты		Экономия
		на приобретение	на восстановление	
1	Корпус коробки передач МТЗ-82	30,0	5,0	25,0
2	Полуось заднего моста МТЗ-82	6,0	2,0	4,0
3	Чулки одного ведущего моста КамАЗ	40,0	10,0	30,0
4	Опора промежуточная МТЗ-82	5,0	2,0	3,0

Наряду с указанным, на практике часто необходимо устранять на рабочих поверхностях деталей локальные дефекты, что также успешно решается применением метода ЭИЛ.

На рис. 5 приведен пример восстановления головки блока цилиндров дизельного двигателя DXi11 грузового автомобиля «ВОЛЬВО». В двигателе блок цилиндров и его головка наиболее нагружены, они подвергаются многократным термическим и динамическим нагрузкам, кроме того, это достаточно



а)

б)

Рис. 5. Дефектная (а) и восстановленная (б) поверхность разъема головки блока цилиндров

Fig. 5. Defective (a) and reconditioned (b) surface of the cylinder head connector

Другими ответственными деталями являются гильзы цилиндров дизельных двигателей. У них часто встречаются дефекты в виде кольцевой выработки в верхней части (рис. 6а), глубина которой не превышает 150 мкм, и задиры зеркала. Нанесение ЭИ покрытия и последующее хонингование ручным инструментом не занимает более 30 минут, результат обработки виден на рис. 6б. По аналогичной технологии устраняются дефекты в виде задириков.

Вместе с тем, часто возникает необходимость восстановления ответственных деталей с большой выработ-

дорогие детали. После снятия головки с блока цилиндров оказалось, что вследствие неправильной эксплуатации на плоскости разъема этих деталей образовался свищ общей высотой более 3 мм (рис. 5а). Время полного восстановления головки и блока методом ЭИЛ составляло не более 3-х часов. При этом работа выполнена по месту, без снятия двигателя с машины, что значительно ускорило ремонт и снизило затраты на него. На рис. 5б показана восстановленная поверхность этой детали.



а)

б)

Рис. 6. Изношенные (а) и восстановленные (б) гильзы цилиндров двигателя CAT-3116

Fig. 6. Worn (a) and restored (b) cylinder liners of the SAT-3116 engine

кой. Одними из многих примеров могут служить детали делительных устройств тестоделителей, износ которых неравномерен и достигает многих миллиметров. На рис. 7 приведен пример восстановления формы и размеров основания всасывающей камеры тестоделителя, износ которого в передней части составлял 8 мм. Восстановление методом ЭИЛ выполнено с применением технологического приема формирования толстослойных покрытий повышенной сплошности [13].

Приведенные данные свидетельствуют о высокой универсальности и

эффективности метода ЭИЛ. При этом отметим, что себестоимость нанесения ЭИ покрытий находится в пределах от 2 до 20 руб/см² в зависимости от технологии ЭИЛ, определяющей толщину, качество и свойства покрытий.

Благодаря своим положительным качествам и эффективности, метод ЭИЛ

по достоинству оценен и используется практически во всех технически развитых странах, многие из которых выпускают свои установки [15]. Они применяются как в единичном, так и крупносерийном производстве, как в ручном, так и в механизированном режимах, включая роботизированные комплексы (рис. 8).



а)



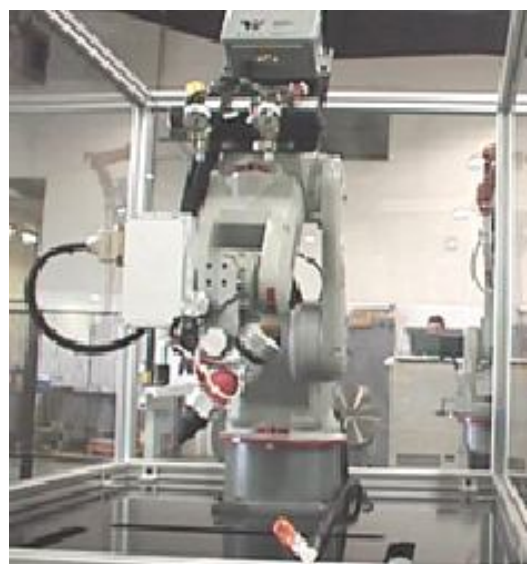
б)

Рис. 7. Основание всасывающей камеры тестоделителя «Benier 80-20» до восстановления, износ до 8 мм **(а)** и после восстановления **(б)** методом ЭИЛ

Fig. 7. The base of the suction chamber of the Benier 80-20 dough divider before recovery, wear up to 8 mm **(a)** and after recovery **(б)** by ESA



а)



б)

Рис. 8. Современное оборудование ЭИЛ: **а** – ручная установка «БИГ-4»; **б** – робототехнический комплекс ЭИЛ (США, фирма «ASAP»)

Fig. 8. Modern EIL equipment: **a** – manual installation "BIG-4"; **б** — EIL robotic system (USA, ASAP)

В отличие от многих других методов, он может эффективно использоваться автономно, вдали от систем электроснабжения и ремонтных баз, что особенно актуально в условиях отдаленных территорий.

Выводы

1. Приведенными примерами практического применения метода ЭИЛ под-

тверждается положение о высокой универсальности и эффективности этого метода для решения задач машиностроительного и ремонтного производства.

2. Метод ЭИЛ может быть особенно полезен в условиях отдаленности объектов ремонта от специализированных ремонтных баз.

Список литературы

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Физика электроискрового способа обработки материалов. М.: ЦБТИ МЭП, 1946.
2. Spadło S. Comparative studies of brush electrodischarge machining with electrodes of alloy steel and tungsten. *Advanced Manufacturing Systems and Technology, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Courses and Lectures*. Springer – Verlag Wien New York. 2002. № 437. P. 515-524.
3. Radek N., Bartkowiak K. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam // *Physics Procedia*. 2010. № 5. P. 417-423.
4. Chang-bin T., Dao-xin L., Zhan W., Yang G. Electro-spark alloying using graphite electrode on titanium alloy surface for biomedical applications // *J. Applied Surface Science*. 2011. № 257. P. 6364-6371.
5. Victor Verbitchi, Cristian Ciuca, Radu Cojocar. Electro-spark coating with special materials // *Nonconventional Technologies Review*. 2011. № 1. P. 57-62.
6. Xie Y.J., Wang M.C., Huang D.W. Comparative study of microstructural characteristic of electrospark and Nd: YAG laser epitaxially growing coatings // *J Applied Surface Science*. 2007. № 253(14). P. 6149–6156.
7. Ribalko A.V., Sahin O. The use of bipolar current pulses in electro spark alloying of metal surfaces // *Surface & Coatings Technology*. 2003. № 168. P. 129-135.
8. Николенко С.В., Верхотуров А.Д. Новые электродные материалы для электроискрового легирования. Владивосток: Дальнаука, 2005. 219 с.
9. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Skryleva E.A., Sviridova T.A., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V. Conditions for formation of MAX phase Cr₂AlC in electrospark coatings deposited onto titanium alloy // *Surface & Coatings Technology*. 2016. № 298. P. 15–23.

10. Михайлов В.В., Бачу К.А., Пасинковский Е.А., Перетятку П.В. К вопросу электроискрового легирования титана и его сплавов // *Электронная обработка материалов*. 2006. № 3. С. 106–111.
11. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенин, В.И. Иванов, С.А. Величко, П.А. Ионов. Саранск, 2003. 504 с.
12. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) / Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенин [и др.]. Саранск, 2003. 504 с.
13. Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х., Денисов В.А. Электроискровой способ нанесения толстослойных покрытий повышенной сплошности / *Евразийский патент № 017066*, опубл. 28.09.2012. Бюллетень ЕАПВ «Изобретения (евразийские заявки и патенты)». № 9. 2012.
14. Гвоздев А.А., Иванов В.И., Костюков А.Ю. О развитии опыта восстановления неподвижных соединений нанесением электроискровых покрытий // *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2017. № 12. С. 9-12.
15. Иванов В.И. Электроискровые технологии и оборудование в России и за рубежом // *Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт*. 2017. № 5. С. 41-54.

References

1. Lazarenko B.R., Lazarenko N.I. *Fizika elektroiskrovogo sposoba obrabotki materialov* [Physics of the electrospark method of processing materials]. Moscow, 1946 (In Russ.).
2. Spadło S. Comparative studies of brush electrodischarge machining with electrodes of alloy steel and tungsten. *Advanced Manufacturing Systems and Technology*, International Center for Mechanical Sciences (CISM), Courses and Lectures. Springer. *Verlag Wien New York*, 2002, no.437, pp. 515-524.
3. Radek N., Bartkowiak K. Performance properties of electrospark deposited by carbide-ceramic coatings modified by laser beam. *Physics Procedia*. 2010, no. 5, pp. 417-423.
4. Chang-bin T., Dao-xin L., Zhan W., Yang G. Electrospark alloying using graphite electrode on a titanium alloy surface for biomedical applications. *J. Applied Surface Science*, 2011, no.257, pp. 6364-6371.
5. Victor Verbitchi, Cristian Ciuca, Radu Cojocar. Electro-spark coating with special materials. *Nonconventional Technologies Review*, 2011, no.1, pp. 57-62.

6. Xie Y.J., Wang M.C., Huang D.W. Comparative study of microstructural characteristics of electrospark and Nd: YAG laser epitaxially growing coatings. *J Applied Surface Science*, 2007, no. 253 (14), pp. 6149-6156.
7. Ribalko A.V., Sahin O. The use of bipolar current pulses in electro spark alloying of metal surfaces. *Surface & Coatings Technology*, 2003, no. 168, pp. 129-135.
8. Nikolenko S.V., Verkhoturov A.D. *Novye elektrodnye materialy dlya elektroiskrovogo legirovaniya* [New electrode materials for electrospark alloying]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2005, 219 p. (In Russ.).
9. Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Skryleva E.A., Sviridova T.A., Kiryukhantsev-Korneev Ph.V. Conditions for the formation of MAX phase Cr₂AlC in electrospark coatings deposited onto titanium alloy. *Surface & Coatings Technology*, 2016, no. 298, pp. 15-23.
10. Mikhailov V.V., Bachu K.A., Pasinkovsky E.A., Peretyatku P.V. K voprosu elektroiskrovogo legirovaniya titana i ego splavov [On the issue of electrospark doping of titanium and its alloys]. *Elektronnaya obrabotka materialov = Electronic material processing*, 2006, no. 3, pp. 106-111 (In Russ.).
11. Burumkulov F.H., Lezin P.P., Senin P.V., Ivanov V.I., Velichko S.A., Ionov P.A. *Elektroiskrovyye tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin i instrumentov (teoriya i praktika)* [Electrospark technologies for the restoration and hardening of machine parts and tools (theory and practice)]. Saransk, 2003, 504 p. (In Russ.).
12. Ogareva N.P., Burumkulov F.H., Lezin P.P., Senin P.V. *Elektroiskrovyye tekhnologii vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin i instrumentov (teoriya i praktika)* [Electrospark technology for restoration and hardening of machine parts and tools (theory and practice)]. Saransk, 2003, 504 p. (In Russ.).
13. Ivanov V.I., Burumkulov F.Kh., Denisov V.A. Elektroiskrovoy sposob naneseniya tolstosloinykh pokrytii povyshennoi sploshnosti [Electrospark method for applying thick-layer coatings of increased continuity]. Eurasian patent No. 017066, publ. 09/28/2012. EAPO Bulletin "Inventions (Eurasian Applications and Patents)", no. 9, 2012 (In Russ.).
14. Gvozdev A.A., Ivanov V.I., Kostyukov A.Yu. O razvitii opyta vosstanovleniya nepodviznykh soedinenii naneseniem elektroiskrovyykh pokrytii [On the development of the experience of restoring fixed joints by applying electrospark coatings]. *Remont, vostanovlenie, modernizatsiya = Repair, restoration, modernization*, 2017, no. 12, pp. 9-12 (In Russ.).

15. Ivanov V.I. Elektroiskrovye tekhnologii i oborudovanie v Rossii i za rubezhom [Electrospark technologies and equipment in Russia and abroad]. *Sel'skokhozyaistvennaya tekhnika: obsluzhivanie i remont = Agricultural machinery: maintenance and repair*, 2017, no. 5, pp. 41-54 (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Иванов Валерий Игоревич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией «Электроискровые и термодиффузионные процессы», ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Valery I. Ivanov, Cand. of Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Electrospark and Thermal Diffusion Processes, Federal State Budgetary Institution Scientific Center for Scientific and Applied Mathematics, VIM, Moscow, Russian Federation, e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Денисов Вячеслав Александрович, доктор технических наук, руководитель направления ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: va.denisov@mail.ru

Vyacheslav A. Denisov, Dr. of Sci. (Engineering), Head of Department, Federal State Budgetary Institution of Higher Vocational Education and Science VIM, Moscow, Russian Federation, e-mail: va.denisov@mail.ru

Игнатьков Дмитрий Андреевич, доктор технических наук, профессор, БГАТУ, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: d.ignatkov@mail.ru

Dmitry A. Ignatkov, Dr. of Sci. (Engineering), Professor, BSATU, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: d.ignatkov@mail.ru