



СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ БУРОВЫХ УСТАНОВОК И ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Д.Н. КОРОТАЕВ, Е.В. ИВАНОВА*

ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе»
23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Развитие современной техники и технологий геолого-разведочных работ, горнодобывающих процессов требует решения задач, связанных с обеспечением надежности, долговечности деталей механизмов, работающих в условиях повышенных температур и давлений при наличии агрессивной внешней среды. В связи с этим возникает необходимость в создании функциональных покрытий, обладающих уникальными физико-механическими и эксплуатационными свойствами.

Цель — повышение эксплуатационных свойств электроискровых покрытий на основе анализа причинно-следственной диаграммы и регрессионного исследования технологических режимов обработки стальных деталей геолого-разведочного оборудования (на примере штоков гидроцилиндров буровых насосов).

Материалы и методы. Для упрочнения стальных поверхностей деталей гидравлического оборудования применена технология электроискрового легирования (ЭИЛ) на механизированной установке IMES-1001 с использованием твердосплавных электродов и различных газовых сред. С целью выявления причинно-следственных связей между факторами воздействия на упрочняемую поверхность и установления наиболее важных факторов, влияющих на качество сформированного покрытия, использована диаграмма Исикавы и выполнен регрессионный анализ. Оценка адгезионной активности полученных покрытий осуществлялась методом атомно-силовой микроскопии. Для этого проводили исследования на сканирующем зондовом микроскопе Solver PRO в полуконтактном режиме сканирования на воздухе с использованием зондовых датчиков марки NSG10 с резонансной частотой 219 кГц и радиусом закругления острия зонда 10 нм. При определении силы адгезионного взаимодействия зонда и поверхности в одной точке абсолютная погрешность составляла 15 нН. Трибологические испытания осуществлялись на стандартной машине трения 2070-CMT-1 по схеме «диск — колодка».

Результаты. На основе анализа причинно-следственной диаграммы установлено, что одним из доминирующих факторов, который влияет на качество формируемых слоев и покрытий на поверхности, являются технологические режимы установки электроискрового легирования. Для того чтобы выявить, какой из технологических параметров оказывает наибольшее влияние, выполнен регрессионный анализ, который показал, что наибольшее влияние на силу адгезии сформированного ЭИЛ покрытия имеет емкость конденсаторов установки. Следовательно, для уменьшения силы адгезионного взаимодействия поверхностей и, как следствие, повышения их износостойкости необходимо при реализации технологии ЭИЛ увеличивать емкость конденсаторов с одновременным уменьшением напряжения и времени обработки. На основе трибологических испытаний сделан вывод, что минимальная скорость изнашивания покрытия может быть получена при легировании стальной поверхности в среде кислорода твердосплавным электродом на основе карбида вольфрама с добавками элементов, образующих с материалом поверхности неограниченные твердые растворы и выполняющих роль флюсов (Ni-Cr-B-Si).

Заключение. В связи с тем что при реализации горнодобывающих и геолого-разведочных процессов повышаются требования к эксплуатационным характеристикам металлических поверхностей деталей, вступающих во фрикционное взаимодействие, возникает необходимость в совершенствовании технологий создания функциональных (износостойких) покрытий.

Ключевые слова: гидравлическое оборудование, покрытие, износостойкость, электроискровое легирование, причинно-следственная диаграмма, регрессионный анализ

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Коротаев Д.Н., Иванова Е.В. Совершенствование технологии электроискрового легирования стальных деталей буровых установок и горнодобывающего оборудования. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2022;64(1):88—97. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-1-88-97>

Статья поступила в редакцию 30.06.2021

Принята к публикации 27.05.2022

Опубликована 22.06.2022

* Автор, ответственный за переписку

IMPROVEMENT OF ELECTROSPARK DEPOSITION TECHNOLOGY OF STEEL UNITS FOR DRILLING RIGS AND MINING EQUIPMENT

DMITRY N. KOROTAEV, ELENA V. IVANOVA*

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

ANNOTATION

Introduction. The development of modern equipment and technologies for geological exploration and mining processes raises the problem of ensuring the reliability and durability of mechanic units operating under the conditions of elevated temperatures and pressures in the presence of aggressive external environments. In this regard, there is a need to create functional coatings with unique physical, mechanical and operational properties.

Aim. To improve the performance of electrospark coatings based on an analysis of a cause-and-effect diagram and a regression study of the technological modes of processing steel units of geological exploration equipment (on the example of hydraulic cylinder rods of drilling pumps).

Materials and methods. To harden the steel surfaces of hydraulic equipment parts, the technology of electrospark deposition (ESD) was used on an IMES-1001 mechanized installation using carbide electrodes and various gas media. In order to identify causal relationships between the factors affecting the hardened surface and to establish the most important factors affecting the quality of the formed coating, the Ishikawa diagram method was used and a regression analysis was performed. The adhesion activity of the obtained coatings was assessed by atomic force microscopy on a Solver PRO scanning probe microscope in a semi-contact air scanning mode using NSG10probe sensors with a resonance frequency of 219 kHz and a radius of curvature of the probe tip of 10 nm. When determining the strength of the adhesive interaction of the probe and the surface at one point, the absolute error was 15 nN. Tribological tests were carried out on a 2070-CMT-1 standard friction machine according to the “disk-shoe” scheme.

Results. The obtained cause-and-effect diagram showed that the technological modes of an electrospark deposition installation comprise a determining factor affecting the quality of the formed layers and coatings. In order to identify those process parameters that had the greatest effect, a regression analysis was carried out. The capacitance of the unit capacitors was found to have the greatest impact on the adhesion force formed by the ESD coating. Therefore, in order to reduce the strength of the adhesive interaction of surfaces and, as a result, increase their wear resistance, it is necessary to increase the capacitance of capacitors while reducing the voltage and processing time when implementing the ESD technology. On the basis of tribological tests, it is concluded that the minimum wear rate of coatings can be obtained by alloying the steel surface in an oxygen environment with a carbide electrode based on tungsten carbide with additives of elements that form unlimited solid solutions with the surface material and perform the role of fluxes (Ni-Cr-B-Si).

Conclusion. Due to strict requirements to the performance of metal surfaces of units that enter into frictional interaction during the implementation of mining and exploration processes, there is a need to improve existing technologies for creating functional (wear-resistant) coatings.

Keywords: hydraulic equipment, coating, wear resistance, electrospark deposition, cause-and-effect diagram, regression analysis

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Funding: the study had no sponsorship.

For citation: Korotaev D.N., Ivanova E.V. Improvement of electrospark deposition technology of steel units for drilling rigs and mining equipment. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2022;64(1):88—97. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2022-64-1-88-97>

Manuscript received 30 June 2021

Accepted 27 May 2022

Published 22 June 2022

* Corresponding author

В Российской Федерации уделяется особое внимание проведению различных видов геолого-разведочных работ. Это связано с тем, что экономика страны имеет преимущественно выраженный сырьевой характер по следующим причинам [13]:

1. Россия чрезвычайно богата полезными ископаемыми, их объем составляет примерно 30% всех мировых запасов.

2. Добыча полезных ископаемых дает нашей стране примерно 30% валового внутреннего продукта.

3. Добываемое сырье до 50% экспортируется и приносит до 80% валютной выручки в бюджет страны.

Геолого-разведочные работы, горнодобывающие процессы и непосредственно добычу полезных ископаемых невозможно осуществлять без применения различных видов техники и оборудования, которые классифицируются как по способу добычи полезных ископаемых (открытый способ, карьер или шахта), так и по виду работ в горном деле. Для каждого вида работ используется специализированные машины [14]: горные экскаваторы, карьерные самосвалы, погрузчики и бульдозеры и другое разнообразное оборудование (буровые станки, дробильно-сортировочное оборудование, проходческие комбайны, погрузочно-доставочные машины и т.д.).

Практически во всех видах горнодобывающей техники применяются разнообразные гидравлические системы и устройства: гидравлический инструмент, гидрозамки, гидрораспределители, гидронасосы, плунжерные насосы, насосные

станции высокого давления, гидравлические прессы, гидромоторы, гидроцилиндры и др. [15]. Основным из центральных факторов, который влияет на ресурс применяемых гидроцилиндров, гидронасосов и др., является гидроабразивное изнашивание деталей, вследствие которого на горно-обогатительных комбинатах наиболее часто требуют замены штоки гидроцилиндров, рабочие колеса, плунжеры, бронедиски и другие детали [10, 11].

Как показывает реальная практика, замена деталей, отработавших рекомендуемый срок эксплуатации, вовремя не осуществляется. Это связано с дефицитом запасных частей для насосов, высокой трудоемкостью и сложностью их замены. Поэтому многие насосы большую часть своего рабочего времени эксплуатируются с пониженной эффективностью, что негативно отражается на экономике горно-обогатительного предприятия.

В научной литературе приводятся исследования [12, 19, 20], в которых предлагают разнообразные варианты увеличения ресурса эксплуатации гидронасосов в условиях гидроабразивного изнашивания. Для этого предлагается нанесение абразивных смесей на трибоповерхности, различных видов напыления и наплавки. Однако такие технологии изменения качества и свойств поверхности приводят к увеличению ее шероховатости и неравномерности дальнейшего изнашивания, что снижает КПД. Поэтому изучение формирования износостойких покрытий на основе модификации композиционными материалами с целью повышения трибологических

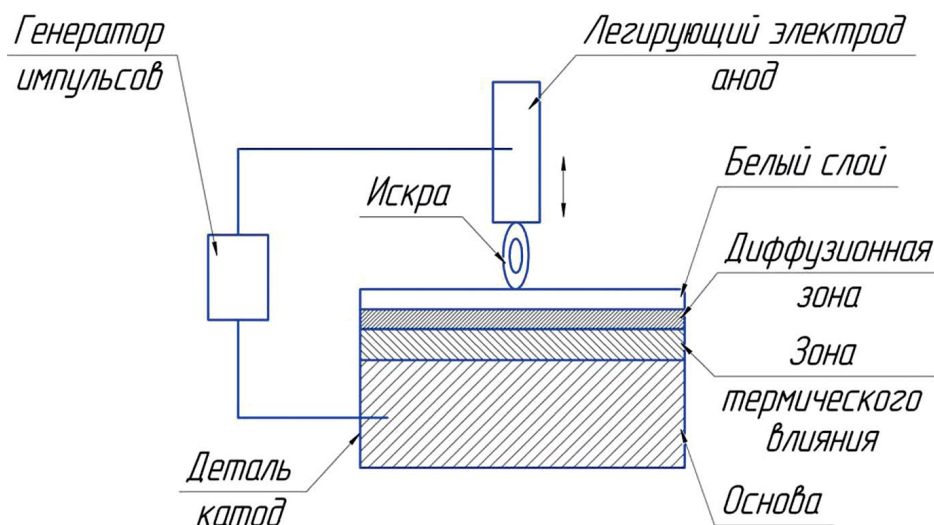


Рис. 1. Общая схема процесса электроискрового легирования
 Fig. 1. General diagram of the electric spark doping process

характеристик стальных деталей требует дополнительного исследования.

Следует отметить, что разработка эффективных способов и технологий, которые позволят уменьшить гидроабразивный износ и максимально увеличить ударно- и износостойкость, является особенно важной и актуальной проблемой отрасли, т.к. они могут существенно повысить долговечность и надежность техники. Актуальность указанной проблемы обуславливает проведение комплексных исследований по материалам износостойких и ударопрочных покрытий, формируемых на быстроизнашиваемых деталях гидроцилиндров и насосов, применяемых в геолого-разведочном и горнодобывающем оборудовании.

В настоящее время существует много традиционных и прогрессивных технологий поверхностного упрочнения, которые приводят к повышению эксплуатационных свойств деталей и в первую очередь износостойкости. Одним из методов, широко применяемым для упрочнения и восстановления поверхностей металлических деталей, является электроискровое легирование (ЭИЛ) [16, 17].

Метод основан на физическом процессе электроискрового взаимодействия анода (легирующий электрод) и катода (упрочняемая поверхность). При подаче напряжения между электродами проходит искра малой длительности воздействия. Температуры поверхностей локально нагреваются и происходит перенос материала легирующего электрода на упрочняемую поверхность. Протекание этого технологического процесса возможно в различных газовых средах, что оказывает влияние на формирование и свойства упрочняемой поверхности (рис. 1). При этом на обрабатываемой поверхности (катоде) формируется покрытие и поверхностный слой с новыми (измененными) физико-химическими и механическими свойствами.

Покрытие на катоде имеет композиционное строение, которое условно можно разделить на отдельные слои. Структурное описание каждого слоя приведено в таблице 1 [18].

Технология ЭИЛ обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами поверхностного упрочнения и термообработки. Отметим эти достоинства:

Таблица 1. Строение поверхностных слоев при электроискровом легировании
 Table 1. Structure of surface layers during electric spark alloying

Слой	Описание
Верхний слой («белый»)	Состоит из материала легирующего электрода и элементов межэлектродной среды
Диффузионная зона	Смесь материалов анода и катода. Образуется в результате диффузии химических элементов материала анода в материал катода (поверхности)
Зона термического влияния	Образуется в результате теплового воздействия. Переходит в структуру основного материала

- возможно упрочнение обрабатываемой поверхности в небольшой ограниченной области (локально) с использованием любых материалов, способных проводить ток;

- свойства упрочненной поверхности характеризуются достаточной для последующей эксплуатации прочностью сцепления покрытия и материала основы, при этом в процессе обработки нет нагрева всей обрабатываемой детали;

- в процессе осуществления технологии ЭИЛ происходит диффузионное обогащение поверхности детали элементами легирующего электрода без изменений размеров детали.

В связи с этим целью настоящей работы является повышение эксплуатационных свойств электроискровых покрытий на основе анализа причинно-следственной диаграммы и регрессионного исследования технологических режимов обработки стальных деталей геолого-разведочного оборудования (на примере штоков гидроцилиндров буровых насосов).

Для установления взаимосвязей между повышением эксплуатационных свойств ЭИЛ и причинами,

влияющими на эффективность указанной технологии, построена причинно-следственная диаграмма Исикавы (рис. 2).

Инструменты управления качеством активно применяют для проведения анализа по выявлению причин и следствий, которые необходимы для решения конкретной проблемы. Диаграмма «рыбий скелет» представляет собой графическое отображение взаимосвязи между результатом (проблемой) и причинами, влияющими на его качество (решение проблемы). Совместно с причинно-следственной диаграммой применяют метод мозгового штурма. Этот метод позволяет провести сортировку по наиболее важным (ключевым) категориям причин проблем.

Для построения диаграммы первоначально необходимо определить результат, который нужно достигнуть, и указать его на главной горизонтальной оси («хребте» диаграммы). В настоящей работе анализируемым потенциальным результатом является увеличение срока эксплуатации машин и оборудования за счет повышения износостойкости поверхности. Далее устанавливаются значимые



Рис. 2. Причинно-следственная диаграмма
Fig. 2. Causal diagram

категории причин, которые влияют на необходимый результат, и указываются на крупных «костях» диаграммы в прямоугольниках (рис. 2). После этого анализируется каждая из категорий, определяются факторы влияния, входящие в эти категории. Факторы наносятся на диаграмму в виде средних и мелких «костей». Эти факторы группируют между собой, стрелками показывают связи влияния на результат. В завершение с помощью диаграммы проводят логический анализ (оценку) и определяют наиболее значимые причины влияния на окончательный результат [6, 9].

Разработанная диаграмма Исикавы предусматривает распределение всех причин, влияющих на формирование износостойких покрытий ЭИЛ, по ключевым категориям: материалы, режимы ЭИЛ, внешняя среда, методы исследования, оборудование. Все причины, которые связаны с исследуемым результатом, детализируются в рамках этих категорий:

- причины, связанные с материалами, включают в себя факторы, обусловленные состоянием и свойствами материала легирующего электрода и упрочняемой металлической поверхности. Например, это химический состав, структура материалов и т.д.;

- причины, связанные с режимами ЭИЛ, включают в себя технологические параметры технологии ЭИЛ: время воздействия (время легирования), длительность импульса искрового разряда, энергия в импульсе, которая зависит от напряжения 1 между легирующим электродом и поверхностью и разрядной емкости конденсаторов 2;

- причины, связанные с внешней средой, — это межэлектродная среда, в которой осуществляется массоперенос материала анода на катод;

- причины, связанные с методами исследования, — это традиционные методы, с помощью которых определяют микроструктуру, состав и свойства обработанной поверхности;

- причины, связанные с оборудованием, — это все факторы, определяющие состояние и возможности оборудования, применяемого для осуществления технологии ЭИЛ: генератор импульсов, механизированная установка, следящая система.

Анализ научных работ в области ЭИЛ [2—5] и причинно-следственной диаграммы Исикавы позволил установить, что основными факторами, которые влияют на качество и свойства обрабатываемых поверхностей (покрытий), являются материал легирующего электрода и технологические режимы установки ЭИЛ: емкость конденсаторов и напряжение в импульсе.

Влияние материала легирующего электрода на эксплуатационные свойства поверхностей, обработанных ЭИЛ, исследовано в работе [7].

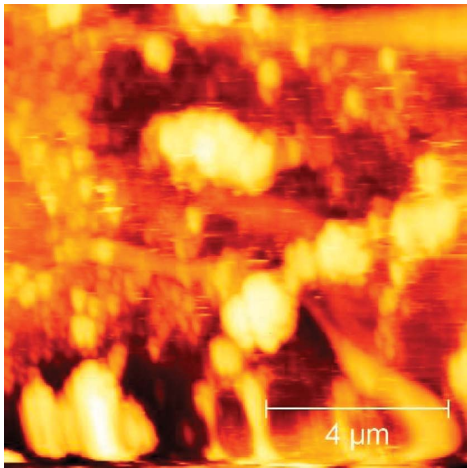
Для реализации поставленной цели осуществлялась обработка образцов из стали 45 на различных технологических режимах, при этом напряжение между электродами варьировало в пределах $U = 80 \div 120$ В, емкость конденсаторов составляла $C = 14 \div 120$ мкФ, время обработки $2 \div 3$ мин/см². В качестве оборудования использовали механизированную установку ЭИЛ IMES-1001, предназначенную для электроискровой обработки деталей машин круглого поперечного сечения, оснащенную генератором импульсов IMES-01-2 с электронным блоком (следящей системой), который обеспечивает заданный межэлектродный зазор.

Известно, что в процессе эксплуатации стальных деталей машин и оборудования значительная их часть теряет работоспособность в результате изнашивания контактирующих поверхностей [1]. Изнашивание возникает в результате адгезионного взаимодействия, возникающего между двумя поверхностями, соприкасающимися под действием сжимающей нагрузки и повышенной температуры при трении.

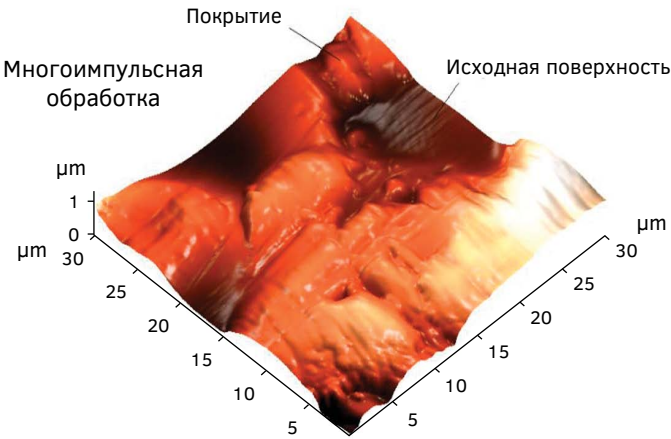
Оценку износостойкости поверхностей, сформированных ЭИЛ, осуществляли на основе измерения силы адгезии. Сила адгезии возникает между поверхностью и зондом сканирующего микроскопа Solver PRO в полуконтактном режиме сканирования с использованием зондовых датчиков марки NSG10 с резонансной частотой 219 кГц и радиусом закругления острия зонда 10 нм. При этом необходимо установить, при каких технологических режимах упрочнения сила адгезии минимальна.

Для измерения силы адгезии снимали кривые подвода-отвода зонда относительно поверхности образца, отражающие зависимость изгиба консоли зонда под действием поверхностных сил при его подводе (отводе) к поверхности (от поверхности) [8]. Типичная топография обработанных методом ЭИЛ приведена на рисунке 3 в 2D- и 3D-поверхностях.

Влияние технологических режимов обработки ЭИЛ на силу адгезионного взаимодействия исследовали, используя планирование многофакторного эксперимента. В качестве функции отклика выбрана зависимость силы адгезии от режимов ЭИЛ. Факторами воздействия на исследуемый объект (силу адгезии) были приняты: X_1 — напряжение между легирующим электродом и поверхностью; X_2 — емкость конденсаторов; X_3 — время обработки ЭИЛ.



2D-поверхность



3D-поверхность

Рис. 3. Топография поверхности стального образца, обработанного электродом состава 50% WC-Co и 50% Ni-Cr-B-Si на режимах: $U = 160$ В; $C = 240$ мкФ ($E = 3,07$ Дж)
Fig. 3. Topography of surface of steel sample treated with electrode of composition 50% WC-Co and 50% Ni-Cr-B-Si in modes: $U = 160$ V; $C = 240$ μ F ($E = 3.07$ J)

Экспериментальные результаты по технологическим режимам и полученным средним значениям силы адгезии представлены в таблице 2 для каждого из восьми опытов при максимальных и минимальных значениях независимых факторов. Выбор интервалов варьирования для X_1 и X_2 осуществлялся с учетом пределов регулирования параметров установки ЭИЛ.

На основе анализа экспериментальных результатов получено уравнение регрессии в следующем виде:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_{12} + b_{13}X_{13} + b_{23}X_{23} + b_{123}X_{123}$$

В данной задаче фигурируют три фактора ($K = 3$), поэтому количество опытов полного факторного

эксперимента составляет $N = 2^3 = 8$. Вычисленные коэффициенты регрессии представлены в таблице 3.

Для исследуемого параметра Y получено уравнение регрессии следующего вида:

$$Y = 74,79 + 17,21X_1 - 27,29X_2 + 12,29X_3 - 0,71X_1X_2 + 14,71X_1X_3 + 0,21X_2X_3 + 6,79X_1X_2X_3$$

Проверку значимости коэффициентов регрессии осуществляли по критерию Стьюдента. Эта проверка показала, что коэффициенты b_{12} , b_{23} , b_{123} являются незначимыми. Поэтому уравнение регрессии для параметра сила адгезии Y окончательно приняло следующий вид:

$$Y = 74,79 + 17,21X_1 - 27,29X_2 + 12,29X_3 + 14,71X_1X_3$$

Таблица 2. Условия эксперимента и результаты испытаний стали 45, обработанной электроискровым легированием
Table 2. Experimental Conditions and Test Results of Electro-Spark Alloyed Steel 45

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8
Напряжение, В (X_1)	80	120	80	120	80	120	80	120
Емкость, мкФ (X_2)	14	14	120	120	14	14	120	120
Время обработки, мин (X_3)	3	3	3	3	2	2	2	2
Сила адгезии, нН (Y)	88,3	140	22	98	80	100	40	30

Таблица 3. Коэффициенты уравнения регрессии
Table 3. Regression equation coefficients

$b_0 = 74,79$	$b_2 = -27,29$	$b_{12} = -0,71$	$b_{23} = 0,21$
$b_1 = 17,21$	$b_3 = 12,29$	$b_{13} = 14,71$	$b_{123} = 6,79$

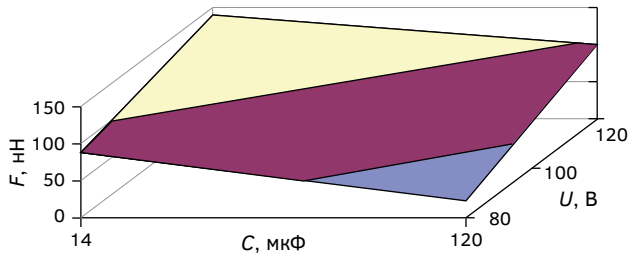


Рис. 4. Поверхность отклика для параметра оптимизации (сила адгезии) с обработкой ЭИЛ электродом состава 50% WC-Co и 50% Ni-Cr-B-Si

Fig. 4. Response surface for optimization parameter (adhesion force) with 50% WC-Co and 50% Ni-Cr-B-Si treatment with EIL electrode

Чтобы визуализировать взаимосвязь технологических параметров ЭИЛ с силой адгезии, построены поверхности отклика (рис. 4).

На основании анализа полученных результатов были сформулированы выводы о влиянии технологических режимов ЭИЛ (напряжение, емкость, время обработки) на силу адгезионного взаимодействия между поверхностями: 1) характер зависимости силы адгезии от напряжения в искровом импульсе и времени обработки — линейный и прямо пропорциональный; 2) характер зависимости силы адгезии от емкости конденсаторов — линейный и обратно пропорциональный; 3) наряду с указанными линейными эффектами выявлено влияние взаимодействия напряжения и времени обработки, что является значимым при определенных комбинациях технологических режимов ЭИЛ; 4) характер зависимости силы адгезии от напряжения и времени обработки — линейный, прямо пропорциональный.

С учетом результатов регрессионного анализа и построения поверхностей отклика выполнено на обработку ЭИЛ образцов на режимах $U = 80$ В;

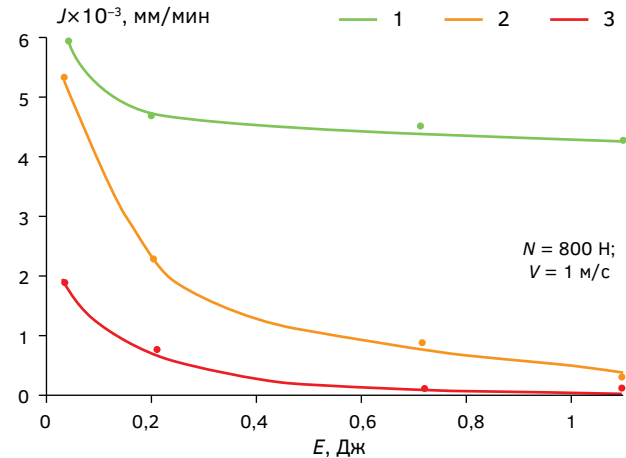


Рис. 5. Зависимость скорости изнашивания от энергии в импульсе: 1 — воздух; 2 — CO_2 ; 3 — O_2 ; N — контактное давление; V — скорость скольжения

Fig. 5. Dependence of wear rate on energy in pulse: 1 — air; 2 — CO_2 ; 3 — O_2 ; N — contact pressure; V — sliding speed

$C = 120$ мкФ; $t = 2$ мин в различных газовых средах и проведены трибологические испытания на стандартной машине трения 2070-CMT-1. Результаты влияния энергии в импульсе (E , Дж) и газовой технологической среде на скорость изнашивания покрытий (J , мм/мин) представлены на рисунке 5.

Таким образом установлено, что наибольший эффект по увеличению износостойкости сформированных покрытий получен при электроискровом легировании в кислородсодержащей среде на технологических режимах: $U = 80$ В; $C = 120$ мкФ; $t = 2$ мин электродом состава 50% WC-Co и 50% Ni-Cr-B-Si. В данных условиях реализации технологии ЭИЛ скорость изнашивания покрытия, сформированного на стальных поверхностях, минимальна.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаркунов Д.Н., Корник П.И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. М.: МСХА, 2003. 344 с.
2. Иванов В.И. О путях повышения эффективности и универсальности электроискрового легирования // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 9 (177). С. 404—411.
3. Иванов В.И., Верхотуров А.Д., Коневцов Л.А. Методологические аспекты применения электроискрового легирования. Часть 1. Методология исследования упрочнения и восстановления деталей, получения электроискровых покрытий // Технический сервис машин. 2019. № 2 (135). С. 158—169.
4. Инновационные материалы и технологии: достижения, проблемы, решения. Школа-семинар по фундаментальным основам создания инновационных материалов и технологий: мат.-лы Междунар. науч.-техн. конф. В 2-х частях. Ч. 1. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. 379 с.
5. Коневцов Л.А., Филонников А.Л., Ринчинова С.В. Становление материаловедения поверхности и методологическая схема упрочнения поверхностей электроискровым легированием // Символ науки: международный научный журнал. 2019. № 1. С. 23—33.
6. Коротаев Д.Н., Иванова Е.В., Худякова О.Д. Управление качеством формирования износостойких покрытий // Вестник КНАГТУ. 2021. № 1. С. 10—15.

- стойких поверхностных слоев методом электроискрового легирования // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2015. № 5 (218). С. 34—37.
7. Коротаев Д.Н., Машков Ю.К., Алимбаева Б.Ш. Влияние материала легирующего электрода на фазовый состав и толщину покрытия при электроискровой обработке // Динамика систем, механизмов и машин. 2012. № 2. С. 371—374.
 8. Коротаев Д.Н., Машков Ю.К. и др. Влияние электроискрового легирования стальных образцов на уровень их адгезионного взаимодействия // Трения и смазка в машинах и механизмах. 2008. № 7. С. 17—20.
 9. Логанина В.И. Федосеев А.А. Инструменты качества: учебное пособие. М.: Книжный дом «Университет», 2008. 142 с.
 10. Пенкин Н.С., Капралов Е.П., Маляров П.В. и др. Повышение износостойкости горно-обогатительного оборудования / Под ред. Н.С. Пенкина. М.: Недра, 1992. 264 с.
 11. Поветкин В.В., Татыбаев М.К., Альпеисов А.Т. и др. Основные показатели работы грунтовых насосов и износ рабочих деталей насоса // Актуальные вопросы технических наук в современных условиях: сборник науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. 2015. С. 113—119.
 12. Fauchais P., Vardell A. Innovative and emerging processes in plasma spraying: from micro-to nano-structured coatings // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. P. 194011.
 13. [https://www.neftegazexpo.ru/common/img/uploaded/exhibitions/neftegaz/doc_2018/Neftegaz_Digest_2018.03\(10\).pdf](https://www.neftegazexpo.ru/common/img/uploaded/exhibitions/neftegaz/doc_2018/Neftegaz_Digest_2018.03(10).pdf) (дата обращения: 24.06.2022)
 14. <https://os1.ru/article/23040-kratkiy-obzor-gornodobyvayushchego-oborudovaniya-trudyagidobytchiki> (дата обращения: 24.06.2022)
 15. <https://poisk-ru.ru/s36124t3.html> (дата обращения: 24.06.2022)
 16. Korotaev D.N. and others. Formation of wear nanostructural topocomposite coating on metal materials by ion-plasma processing // В сб.: Journal of Physics: Conference Series. 2018. С. 012037.
 17. Korotaev D.N. et al. Structural-morphological features and fretting resistance of nanostructured topocomposites formed by ion-plasma modification // В сб.: Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update. 2019. С. 062013.
 18. Korotaev D.N. et al. Peculiarities of wear of nanostructured topocomposites on the hard-alloy basis // В сб.: Journal of Physics: Conference Series. electronic collection. 2020. С. 012008.
 19. Savinkin V.V., Kolisnichenko S.N., Ivanova O.V., Zhumekenova Z.Z., Sandu A.V., Vizureanu P. Investigation of the strength parameters of drilling pumps during the formation of contact stresses in gears // Applied Sciences (Switzerland). 2021. V. 11. № 15. 7076. <https://doi.org/10.3390/app11157076>
 20. Zhumekenova Z.Z., Savinkin V.V., Kolisnichenko S.N. On the issue of advanced technologies for restoring wear surfaces // Вестник Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева. 2020. Т. 2. С. 170.

REFERENCES

1. Garkunov D.N., Kornik P.I. Types of friction and wear. Operational damage to machine parts. Moscow: MCXA, 2003. 344 p.
2. Ivanov V.I. On ways to increase the efficiency and versatility of spark doping//Strengthening technologies and coatings. 2019. V. 15. No. 9 (177). P. 404—411.
3. Ivanov V.I., Verkhuturov A.D., Konevtsov L.A. Methodological aspects of the use of electric spark doping. Part 1. Methodology for the study of hardening and restoration of parts, production of electric spark coatings // Technical service of machines. 2019. No. 2 (135). P. 158—169.
4. Innovative materials and technologies: achievements, problems, solutions. School-seminar on the fundamental basics of creating innovative materials and technologies: materials of the International Scientific and Technical Conference. In 2 parts. P. 1. Komsomolsk-on-Amur: FSBEI HPE "KnAGTU", 2013. 379 p.
5. Konevtsov L.A., Filonnikov A.L., Rinchinova S.V. Formation of surface materialology and methodological scheme for strengthening surfaces by electric spark doping // Symbol of science: international scientific journal. 2019. No. 1. P. 23—33.
6. Korotaev D.N., Ivanova E.V., Hudyakova O.D. Management of quality of wear-resistant surface layers formation by electric spark alloying method // Reference book. Engineering log with attachment. 2015. № 5 (218). P. 34—37.
7. Korotaev D.N., Mashkov Yu.K., Alimbaeva B.Sh. Influence of alloying electrode material on phase composition and coating thickness during electric spark processing // Dynamics of systems, mechanisms and machines. 2012. No. 2. P. 371—374.
8. Korotaev D.N., Mashkov Yu.K., et al. Influence of electric spark alloying of steel samples on the level of their adhesion interaction // Friction and lubrication in machines and mechanisms. 2008. No. 7. P. 17—20.
9. Loganina V.I. Fedoseev A.A. Quality tools: textbook. Moscow: Book House University, 2008. 142 p.
10. Penkin N.S., Kapralov E.P., Malyarov P.V., et al. Improvement of wear resistance of mining and processing equipment Moscow: Nedra, 1992. 264 p.
11. Povetkin V.V., Tatybaev M.K., Al'peisov A.T., et al. Main indicators of soil pumps operation and wear of pump working parts // Actual issues of technical sciences in modern conditions: collection of scientific tr. following the results of international scientific practice. conf. 2015. P. 113—119.
12. Fauchais P., Vardell A. Innovative and emerging processes in plasma spraying: from micro-to

- nano-structured coatings // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. Vol. 44. P. 194011.
13. <https://os1.ru/article/23040-kratkiy-obzorgornodobyvayushchego-oborudovaniya-trudyagidobytchiki> (date of application: 24.06.2022)
 14. <https://os1.ru/article/23040-kratkiy-obzorgornodobyvayushchego-oborudovaniya-trudyagidobytchiki> (date of application: 24.06.2022)
 15. <https://poisk-ru.ru/s36124t3.html> (date of application: 24.06.2022)
 16. Korotaev D.N., et al. Formation of wear nanostructural topocomposite coating on metal materials by ion-plasma processing // In the collection: Journal of Physics: Conference Series. 2018. P. 012037.
 17. Korotaev D.N., et al. Structural-morphological features and fretting resistance of nanostructured topocomposites formed by ion-plasma modification // In the collection: Journal of Physics: Conference Series. Mechanical Science and Technology Update. 2019. P. 062013.
 18. Korotaev D.N., et al. Peculiarities of wear of nanostructured topocomposites on the hard-alloy basis // In the collection: Journal of Physics: Conference Series. electronic collection. 2020. P. 012008.
 19. Savinkin V.V., Kolisnichenko S.N., Ivanova O.V., Zhumekenova Z.Z., Sandu A.V., Vizureanu P. Investigation of the strength parameters of drilling pumps during the formation of contact stresses in gears // Applied Sciences (Switzerland). 2021. V. 11. № 15. 7076. <https://doi.org/10.3390/app11157076>
 20. Zhumekenova Z.Z., Savinkin V.V., Kolisnichenko S.N. On the issue of advanced technologies for restoring wear surfaces // Bulletin of the Kazakh National Technical University named after K.I. Satpayev. 2020. V. 2. P. 170.

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Коротаев Д.Н. — инициация работы, постановка цели и задач, электроискровое легирование стальных образцов, атомно-силовая микроскопия, трибологические испытания, анализ результатов. Согласен принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Иванова Е.В. — разработка причинно-следственной диаграммы, регрессионный анализ, обработка результатов эксперимента, анализ результатов, оформление работы. Согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Korotaev D.N. — initiation of work, setting the goal and tasks, electric spark alloying of steel samples, atomic force microscopy, tribological tests, analysis of results. I agree to accept responsibility for all aspects of the work.

Ivanova E.V. — development of a causal diagram, regression analysis, processing of experimental results, analysis of results, registration of work. I agree to accept responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT AUTHORS

Коротаев Дмитрий Николаевич — доктор технических наук, профессор кафедры механики и инженерной графики ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия

E-mail: korotaevdn@mgri.ru

Тел.: +7 (929) 362-82-13

SPIN-код: 6607-4877

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5957-4135>

Dmitry N. Korotaev — Dr. of Sci. (Tech.), Prof. of Department of Mechanics and Engineering Graphics of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

E-mail: korotaevdn@mgri.ru

Tel.: +7 (929) 362-82-13

SPIN-code: 6607-4877

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5957-4135>

Иванова Елена Владимировна* — кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе».

23, Миклухо-Маклая ул., Москва 117997, Россия

E-mail: elenaivanova-01@mail.ru

Тел.: +7 (923) 769-77-35

SPIN-код: 5093-2970

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1107-0533>

Elena V. Ivanova* — Cand. of Sci. (Tech.), Associate Professor of Departments of General Physics of the Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting.

23, Miklukho-Maklaya str., Moscow 117997, Russia

E-mail: elenaivanova-01@mail.ru

Tel.: +7 (923) 769-77-35

SPIN-code: 5093-2970

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1107-0533>

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author