

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.9.048.4

doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-13-23

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ОБКАТЫВАНИЯ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ОПОРНУЮ ДЛИНУ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ПОКРЫТИЯ

Андрей Аркадьевич Жулдыбин¹, Александр Андреевич Владимиров^{2✉}, Антон Иванович Шаповалов³

^{1,2,3} Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) Национального исследовательского технологического университета «МИСИС», Старый Оскол, Россия

² vladimirov.al.an@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7992-1694>

³ shapowalow130477@yandex.ru

Аннотация

Цель исследования заключается в определении влияния режимов обкатывания на формирование относительной опорной длины поверхности твердосплавного электроискрового покрытия.

Задача, решению которой посвящена статья, заключается в исследовании влияния режимов поверхностного пластического деформирования обкатыванием на микрогеометрию поверхности: шероховатость и относительную опорную длину профиля.

Методы исследования. Теоретический анализ литературных источников по теме поверхностного пластического деформирования поверхностей деталей. Натурные эксперименты по обкатыванию твердосплавных электроискровых покрытий, с последующим измерением шероховатости поверхности, относительной опорной длины профиля, исследованием микрогеометрии поверхности детали по профилограммам.

Новизна работы заключается в том, что разработаны режимы поверхностного пластического деформирования обкатыванием твердосплавных электроискровых покрытий. Практическая значимость состоит в обеспечении возможности обкатывания твердосплавных электроискровых покрытий с одновременным снижением шероховатости поверхности и увеличением относительной опорной длины профиля.

Результаты исследования. В результате проведенного теоретического анализа был опреде-

лен способ поверхностного пластического деформирования. По результатам измерений шероховатости поверхности, относительной опорной длины профиля, микротвердости и толщины электроискровых покрытий после обкатывания были определены режимы, обеспечивающие снижение шероховатости и увеличение относительной опорной длины профиля.

Выводы: для повышения эксплуатационных характеристик деталей, необходимо формирование определенной микрогеометрии поверхности. Наряду с поверхностным упрочнением в виде сформированного твердосплавного электроискрового покрытия необходимо обеспечение низкой шероховатости поверхности и увеличение относительной опорной длины профиля. Особое внимание уделяется исследованию режимов поверхностного пластического деформирования твердосплавных электроискровых покрытий. Сформулировано предположение о механизме обкатывания твердосплавных электроискровых покрытий. Представлены значения параметров микрогеометрии поверхности и их фотографии. Представлены значения шероховатости поверхности, относительной опорной длины профиля поверхности, микротвердости и толщины покрытия.

Ключевые слова: легирование, деформирование, обкатывание, шероховатость, поверхность, длина, микротвердость, толщина, профилограмма, кривая Аббота-Файрстоуна.

Ссылка для цитирования:

Жулдыбин А.А. Влияние режимов обкатывания на относительную опорную длину поверхности электроискрового покрытия / А.А. Жулдыбин, А.А. Владимиров, А.И. Шаповалов // Транспортное машиностроение. – 2026. – № 2. – С. 13-23. doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-13-23.

Original article

Open Access Article

THE EFFECT OF ROLLING MODES ON THE RELATIVE BEARING LENGTH OF THE ELECTRIC SPARK SURFACE COATINGS

Andrey Arkadyevich Zhuldybin¹, Aleksandr Andreevich Vladimirov²✉, Anton Ivanovich Shapovalov³

^{1,2,3} Starooskolsky Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) National Research Technological University "MISIS", Stary Oskol, Russia

² vladimirov.al.an@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7992-1694>

³ shapowalow130477@yandex.ru

Abstract

The study objective is to determine the effect of rolling modes on the formation of the relative bearing length of the surface of hard electric spark facing.

The task to which the paper is devoted is to study the effect of modes of surface plastic deformation by rolling on the microgeometry of the surface: roughness and relative bearing length of the profile.

Research methods. Theoretical analysis of literary sources on the topic of surface plastic deformation of part surfaces. Field experiments on rolling hard electric spark facings, followed by measuring the surface roughness, relative bearing length of the profile, and examining the microgeometry of the part surface using profilograms.

The novelty of the work is in the fact that the modes of surface plastic deformation by rolling hard electric spark facings are developed. The practical significance is to ensure the possibility of rolling hard electric spark facings while reducing surface roughness and increasing the relative bearing length of the profile.

Study results. As a result of the theoretical analysis, the method of surface plastic deformation was determined. Based on the results of measuring surface

roughness, relative bearing length of the profile, microhardness and thickness of electric spark coatings after rolling, modes were determined that reduce roughness and increase the relative bearing length of the profile.

Conclusions: in order to improve the performance of parts, it is necessary to form a certain microgeometry of the surface. Along with surface hardening by forming hard electric spark facing, it is necessary to ensure a low surface roughness and increase the relative bearing length of the profile. Special attention is paid to the study of modes of surface plastic deformation of hard electric spark coatings. An assumption is made about the mechanism of rolling hard electric spark coatings. The values of the surface microgeometry parameters and their photographs are presented. The values of surface roughness, relative bearing length of the surface profile, microhardness, and coating thickness are presented.

Keywords: alloying, deformation, rolling, roughness, surface, length, microhardness, thickness, profilogram, Abbott-Firestone curve.

Reference for citing:

Zhuldybin AA, Vladimirov AA, Shapovalov AI. The effect of rolling modes on the relative bearing length of the electric spark surface coatings. *Transport Engineering*. 2026;2:13-23. doi: 10.30987/2782-5957-2026-2-13-23.

Введение

Электроискровое легирование твердосплавными электродами отличается малой толщиной и высокой твердостью сформированных покрытий. Ввиду особенностей процесса электроискрового легирования, шероховатость сформированных покрытий не соответствует требованиям, предъявляемым к контактным поверхностям трения скольжения. Таким образом, для обеспечения повышенных эксплуатационных характеристик поверхностей, упрочненных электроискровым легированием, целесообразно последующая финишная обработка.

Для снижения шероховатости электроискровых покрытий широкое применение

нашли такие способы финишной обработки, как:

- шлифование (полирование);
- поверхностное пластическое деформирование (ППД) [1];
- безабразивная ультразвуковая финишная обработка (БУФО);
- притирка;
- лазерная обработка и др.

Однозначно, что применение дополнительных операций усложняет и удорожает комплексную технологию механизированного электроискрового легирования с последующей финишной обработкой. Помимо этого, не все перечисленные операции будут эффективными при финишной

обработке твердосплавных электроискровых покрытий ввиду такой особенности, как недостаточная толщина покрытия порядка 0,01-0,05 мм меньше или сопоставима с минимальным технологическим припуском на механическую обработку.

Для уменьшения шероховатости упрочненных поверхностей с одновременным повышением эксплуатационных характеристик поверхности было решено применить один из видов ППД, т.к. при пластической деформации будут происходить изменения только в поверхностном слое материала. Существует три основных метода ППД: трением скольжения, трением качения и ударный. В данной работе, исходя из конфигурации объекта исследований и специфики процесса механизированной электроискровой обработки и самого электроискрового покрытия, целесообразно применить метод ППД трением качения, в частности обкатыванием, когда индентор будет обкатывать упрочняемую поверхность. Такой метод финишной обработки покрытия позволит снизить шероховатость поверхности, сохранить электроискровое покрытие и сформировать регулярный микрорельеф за счет трения качения с проскальзыванием, в отличие от алмазного выглаживания [2].

В работах [3] автором представлены результаты исследований поверхностного пластического деформирования обкатыванием. Широкое применение нашел про-

Материалы и методы

Исходя из механизма воздействия поверхностным пластическим деформированием на твердосплавное электроискровое покрытие, в качестве финишной обработки был выбран способ обкатывания инструментом в виде шарика.

Для выявления закономерностей влияния финишной обработки обкатыванием электроискровых покрытий был проведен полный факторный эксперимент по обкатыванию электроискровых покрытий.

Покрытия были сформированы в двух межэлектродных средах на следующих частотно-энергетических режимах:

- напряжение $U - 20$ В;
- сила тока $I - 200$ А;

цесс обкатывания поверхности шарами. Обкатывание шарами обладает рядом таких преимуществ как:

- простота конструкции и универсальность обкатного приспособления;
- применение высококачественных и низких по стоимости стандартных шариков, выпускаемых промышленностью;
- созданием наивыгоднейших условий процесса обкатывания благодаря самоустанавливаемости шаров;
- достижением высоких контактных давлений при сравнительно небольших нормальных (радиальных) силах, передаваемых со стороны деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность детали [4].

Ввиду того, что твердые сплавы не обладают упругостью, в отличие от сталей, механизм обкатывания твердосплавных электроискровых покрытий будет отличаться от механизма обкатывания закаленных сталей, несмотря на сравнительно равные значения твердости поверхности.

Работ, посвященных обкатыванию твердосплавных покрытий, сформированных методом электроискрового легирования, ограниченное количество.

Исследование механизма формирования поверхности при обкатывании электроискровых покрытий является актуальной темой исследований.

- мощность импульсного разряда $P - 4000$ Вт;
- длительность $\tau - 400$ мкс;
- энергия единичного импульсного разряда $E - 1,6$ Дж;
- частота $f - 128$ Гц;
- суммарная энергия за 1 минуту обработки $\sum E - 12,29$ кДж·мин.

Обкатывание производилось на токарном станке *JET* модели *GH-26120ZH DRO RFS* с использованием инструмента для накатного полирования и упрочнения со свободным ходом, где в качестве индентора использовался стальной закаленный шарик.

В качестве оцениваемых результатов процесса были приняты шероховатость поверхности по параметрам Ra и $Rmax$, показатель относительной опорной длины профиля поверхности t_p , измеренный на уровне 40 %.

Измерение шероховатости поверхности производилось при помощи портативного измерителя шероховатости TR200. Измеренные значения шероховатости поверхности по разным параметрам, профилограмма поверхности и относительная опорная длина профиля на уровне выводились на жидкокристаллический дисплей измерителя шероховатости с дальнейшей передачей на персональный компьютер, для последующей оценки и обработки результатов измерений.

С учетом технических характеристик токарного станка, геометрии упрочняемой детали и рекомендаций к выглаживающему инструменту были определены следу-

Результаты и обсуждение

В результате выполненных экспериментов по обкатыванию поверхностей с твердосплавным электроискровым покрытием были получены восемнадцать образцов поверхностей, девять поверхностей с покрытием, сформированным в аргоновой межэлектродной среде, девять в межэлектродной среде из потока воздуха.

В процессе обкатывания электроискровых покрытий диаметр поверхностей уменьшался в диапазоне от 0,05 до 0,2 мм.

Результаты измерений шероховатости поверхности и относительной опорной длины профиля представлены в таблице.

Как очевидно из представленных в таблице значений, значение шероховатости поверхности после обкатывания уменьшилось до значений шероховатости исходной поверхности 5,665 мкм, в следующих диапазонах значений для двух межэлектродных сред:

– для аргоновой: от 3,747 до 7,924 мкм;

– для воздушной: от 4,789 до 7,028 мкм.

При этом, несмотря на снижение шероховатости поверхности, необходимо

обеспечить достижение большего значения относительной опорной длины профиля поверхности, что будет обеспечивать повышение эксплуатационных характеристик поверхности детали.

– диаметр заготовки $d = 60$ мм;
– скорость обкатывания v : 52,75; 75,36; 105,50 м/мин;

– частота вращения заготовки n : 280, 400, 560 об/мин;

– подача s_o : 0,063; 0,1; 0,14 мм/об;

– натяг пружины $t = 2$ мм.

Таким образом, были сформированы покрытия со следующими параметрами:

– в аргоне: толщиной 50,0 мкм, микротвердостью 1118,73 кгс/мм².

– в потоке воздуха: толщиной 56,7 мкм, микротвердостью 786,73 кгс/мм².

Исходя из того, что электроискровые покрытия формировались за четыре прохода при одном направлении вращения обрабатываемой детали, соответственно, обкатывание производилось по такой же схеме, но за два прохода: слева направо, справа налево [5].

Ввиду механизма процесса поверхностного пластического деформирования обкатыванием возможны следующие явления:

– сбивание вершин электроискрового покрытия;

– вкатывание электроискрового покрытия в материал основы;

– истирание электроискрового покрытия.

Независимо от того, какое явление будет происходить при обкатывании твердосплавных электроискровых покрытий, для повышения эксплуатационных характеристик важно сохранить сформированную толщину и микротвердость.

Из значений шероховатости поверхности и относительной опорной длины профиля, представленных в таблице, для дальнейших исследований целесообразно принять образцы, полученные при обкаты-

вании для каждой межэлектродной среды на следующих режимах:

- скорость обкатывания v : 105,50 м/мин;
- частота вращения заготовки n : 560 об/мин;

– подача s_o : 0,063 мм/об.

В результате измерений шероховатости поверхности и относительной опорной длины профиля были получены профилограммы поверхностей до и после обкатывания.

Таблица
Результаты измерений шероховатости и относительной опорной длины профиля

Table

Results of measuring the roughness and relative bearing length of the profile

Образец	Среда	Шероховатость, Ra (до ППД)	Шероховатость, Ra (после ППД)	ΔRa	T_p , %
Исх.	-	5,665	-	-	37,43
1	аргон	11,312	5,433	5,880	55,60
2		13,457	5,583	7,874	65,70
3		12,683	8,876	3,807	55,53
4		14,917	8,043	6,874	71,67
5		10,720	6,783	3,937	57,27
6		11,000	5,953	5,047	66,57
7		12,890	4,966	7,924	55,50
8		11,340	7,099	4,241	70,70
9		12,180	8,433	3,747	65,43
1	компрессор	11,740	5,905	5,835	65,43
2		11,097	5,428	5,669	57,93
3		8,770	5,335	3,434	59,57
4		11,390	6,359	5,031	65,93
5		10,200	4,789	5,411	71,90
6		10,370	6,646	3,724	54,33
7		11,217	5,119	6,098	58,80
8		12,040	5,211	6,829	57,50
9		11,097	7,028	4,086	64,03

Профилограммы поверхности после формирования электроискрового покрытия в аргоновой межэлектродной среде до обкатывания и после представлены на рис. 1 и 2, соответственно.

Как очевидно из представленных профилограмм поверхностей до и после обкатывания, характер вершин микронеровности значительно изменяется из остроконечного в выпуклый со скругленными вершинами, что является следствием воздействия поверхностным пластическим деформированием.

При этом величина относительной опорной длины профиля поверхности, на уровне 40 %, увеличивается, что подтверждается графиками кривых Аббота-

Файрстоуна для покрытия, сформированного в аргоновой межэлектродной среде, до и после обкатывания (рис. 3).

Профилограммы поверхности после формирования электроискрового покрытия в межэлектродной среде из потока воздуха до обкатывания и после представлены на рис. 4 и 5, соответственно.

Как для электроискровых покрытий в аргоновой межэлектродной среде, так и для покрытий в межэлектродной среде из потока воздуха, до и после обкатывания, характер вершин микронеровности также изменяется из остроконечного в выпуклый со скругленными вершинами.

Величина относительной опорной длины профиля поверхности, на уровне

40 %, также увеличивается, что подтверждается графиками кривых Аббота-Файрстоуна для покрытия, сформирован-

ного в межэлектродной среде из потока воздуха, до и после обкатывания (рис. 6).

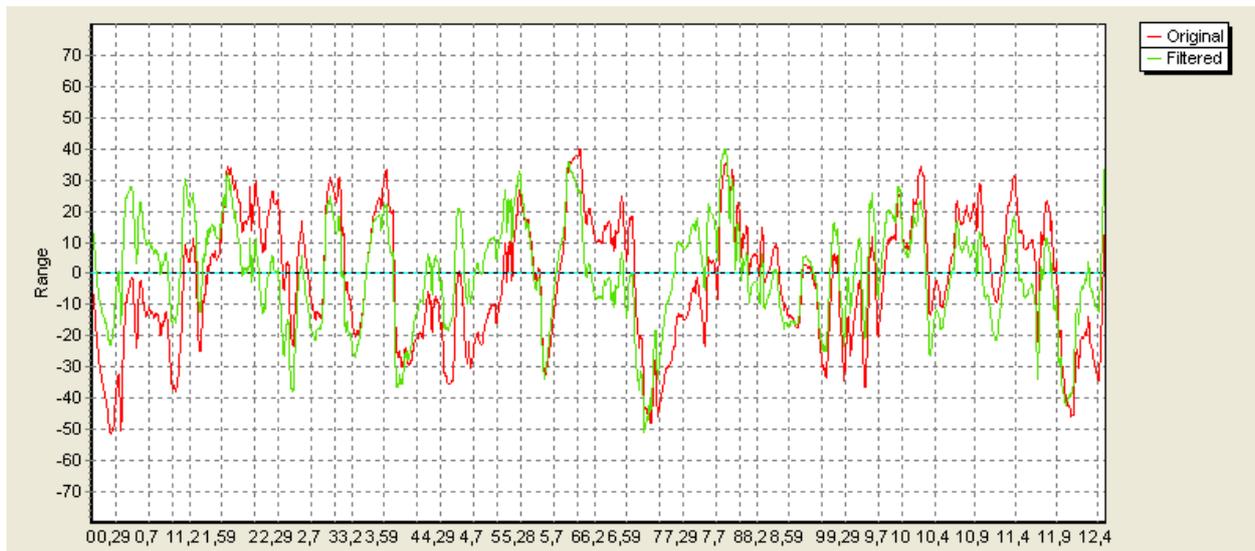


Рис. 1. Профилграмма поверхности покрытия в аргоновой межэлектродной среде до обкатывания
 Fig. 1. Profilogram of the coating surface in an argon interelectrode environment before rolling



Рис. 2. Профилграмма поверхности покрытия в аргоновой межэлектродной среде после обкатывания
 Fig. 2. Profilogram of the coating surface in an argon interelectrode environment after rolling

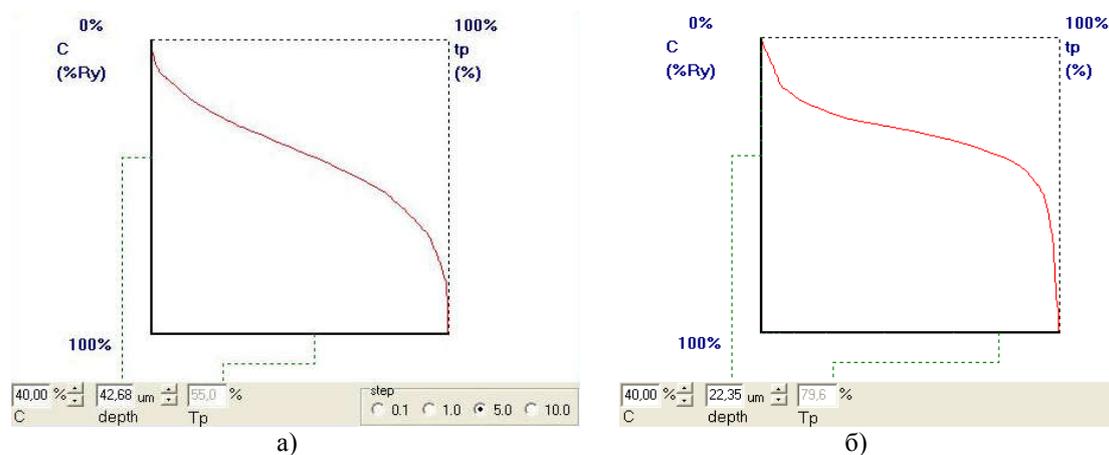


Рис. 3. Графики кривых Аббота-Файрстоуна в аргоновой межэлектродной среде:
 а – до обкатывания; б – после обкатывания
 Fig. 3. Graphs of the Abbott-Firestone curves in an argon interelectrode medium:
 a – before rolling; b – after rolling

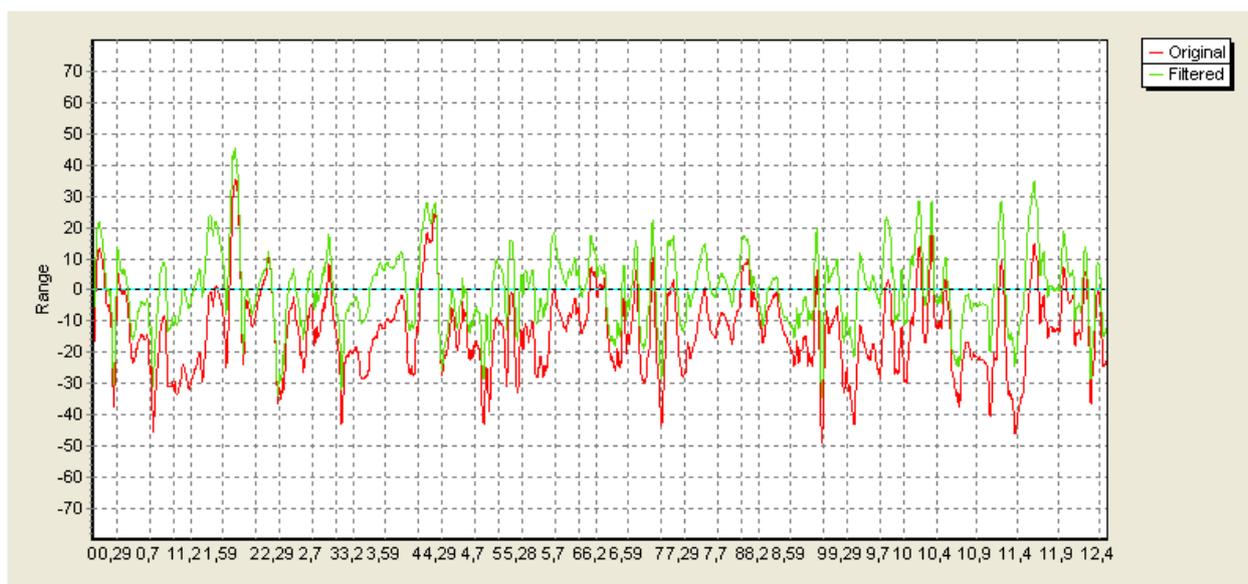


Рис. 4. Профилограмма поверхности покрытия в межэлектродной среде из потока воздуха до обкатывания
Fig. 4. Profilogram of the coating surface in the interelectrode environment from the air flow before rolling

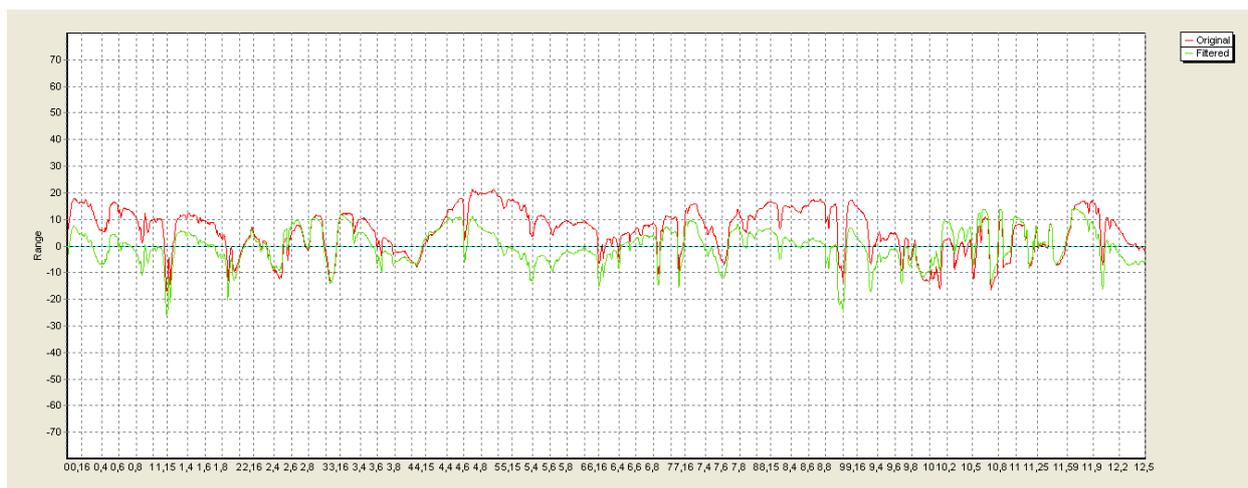


Рис. 5. Профилограмма поверхности покрытия в межэлектродной среде из потока воздуха после обкатывания
Fig. 5. Profilogram of the coating surface in the interelectrode environment from the air flow after rolling

Стоит отметить, что покрытия, сформированные в аргоновой межэлектродной среде, имеют большую относительную опорную длину профиля поверхности, по сравнению с покрытиями в межэлектродной среде из потока воздуха. Такое характер формирования покрытий может быть следствием физических процессов электроискрового легирования, связанного с взаимодействием материала электрода и межэлектродной среды.

Наглядно сравнение графиков кривых Аббота-Файрстоуна для покрытия в

двух межэлектродных средах после обкатывания представлено на рис. 7.

Как очевидно из рис. 7, опорная поверхность твердосплавного электроискрового покрытия, сформированного в аргоновой межэлектродной среде, значительно пологая, и на уровне 40 % имеет величину 79,6 %, в отличие от покрытия в межэлектродной среде из потока воздуха.

Внешний вид поверхностей до и после обкатывания при рассмотрении под микроскопом с четырехкратным увеличением представлен на рис. 8.

Толщина покрытия и значение микротвердости при нагрузке 100 г с четырехкратным увеличением для выбранных

режимов обкатывания представлены на рис. 9.

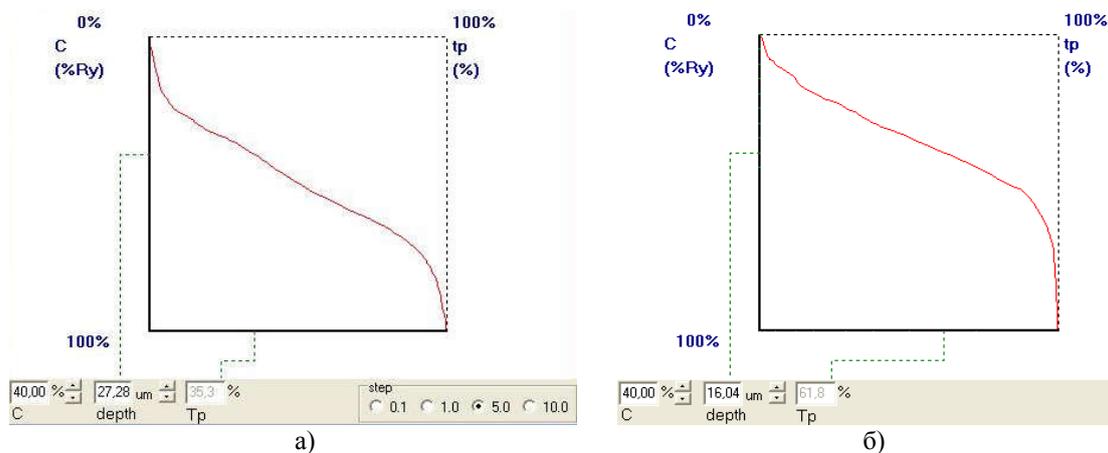


Рис. 6. Графики кривых Аббота-Файрстоуна в межэлектродной среде из потока воздуха: а – до обкатывания; б – после обкатывания
 Fig. 6. Graphs of the Abbott-Firestone curves in the interelectrode medium from the air flow: a – before rolling; б – after rolling

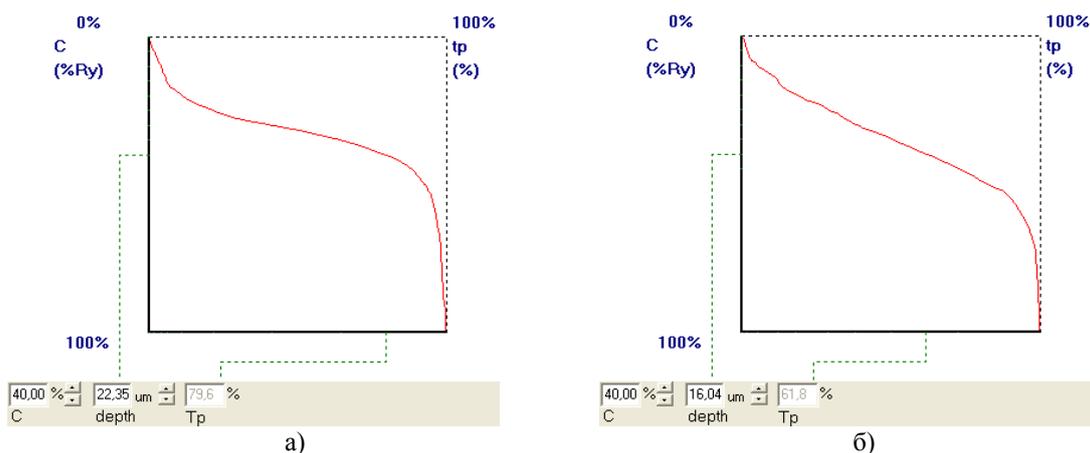


Рис. 7. Графики кривых Аббота-Файрстоуна после обкатывания: а – аргоновая межэлектродная среда; б – межэлектродная среда из потока воздуха
 Fig. 7. Graphs of the Abbott-Firestone curves after running-in: a – argon interelectrode medium; б – interelectrode medium from the air flow

Из представленных на рисунке 8 фотографий поверхностей очевидно следующее:

- не смотря на формирование твердосплавного электроискрового покрытия за четыре слоя, поры в покрытии, являющиеся особенностью электроискрового легирования, остаются;

- в результате обкатывания твердосплавных электроискровых покрытий происходит своеобразная очистка поверхности покрытия от нагара, образуемого в процессе плавления электрода;

- выступающие вершины твердосплавного электроискрового покрытия, являющиеся оксидами электродного материала, разрушаются под действием обкатывающего инструмента на поверхность покрытия.

Из представленных на рис. 9 фотографий и значений микротвердости поверхностей очевидно, что твердосплавное электроискровое покрытие после обкатывания сохранилось. При этом значение микротвердости осталось на том же уровне.

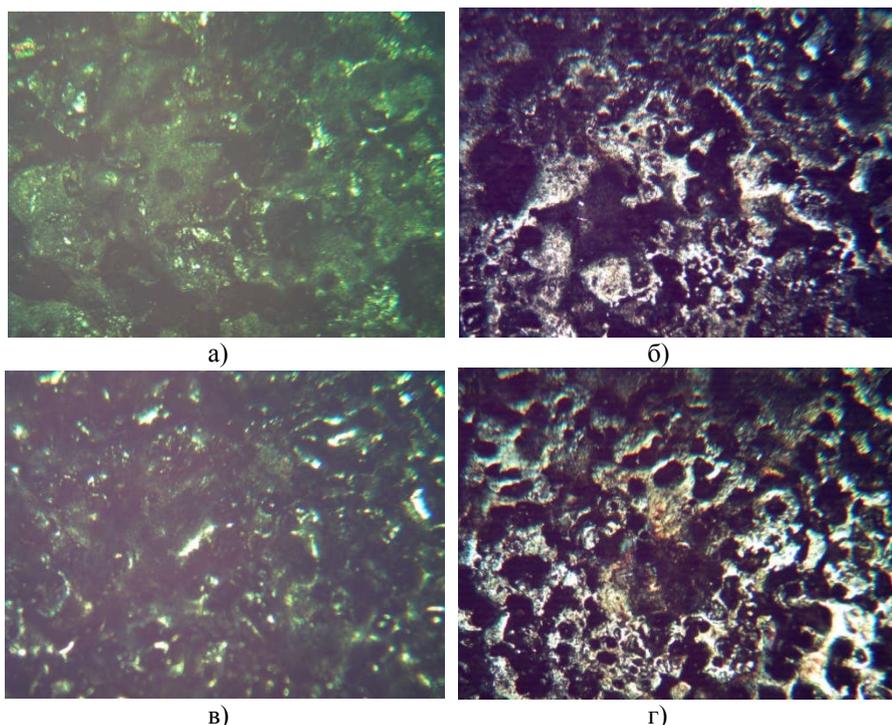


Рис. 8. Фото поверхностей до и после обкатывания: а – образец в аргоне до ППД; б – образец в аргоне после ППД; в – образец в воздухе до ППД; г – образец в воздухе после ППД
 Fig. 8. Photos of surfaces before and after rolling: a – sample in argon before PPD; b – sample in argon after PPD; c – sample in air before PPD; d – sample in air after PPD

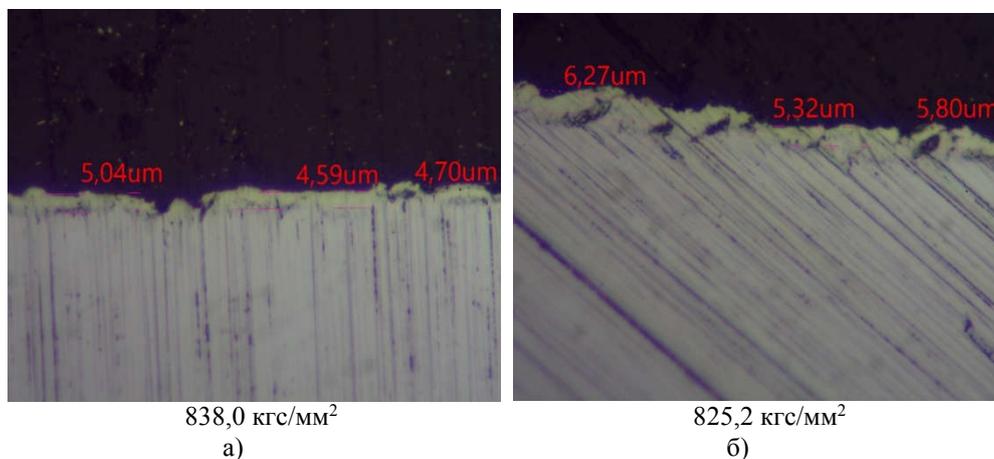


Рис. 9. Толщина и твердость покрытия: а – для аргонной среды; б – для воздушной среды
 Fig. 9. Coating thickness and hardness: a – for argon environment; b – for air environment

Заклучение

Принимая в учет тот факт, что рассматриваемые в данной работе детали работают в условиях трения скольжения, а основным видом износа является истирание поверхности в процессе эксплуатации, то можно сформулировать следующие предположения:

– в результате обкатывания твердосплавных электроискровых покрытий про-

исходит снижение шероховатости поверхности до значений исходной поверхности, полученной после механической обработки резанием;

– наряду со снижением шероховатости поверхности происходит увеличение относительной опорной длины профиля поверхности, что способствует повышению эксплуатационных характеристик;

– наличие на поверхности твердосплавного электроискрового покрытия микрорельефа, является проявлением регулярного микрорельефа поверхности, способного выполнять роль «карманов», удерживающих смазочный материал на контактной поверхности трения.

Таким образом, можно сформулировать вывод о том, что для увеличения экс-

плуатационных характеристик поверхностей трения скольжения целесообразно применение твердосплавных электроискровых покрытий, сформированных механизированным способом в аргоновой межэлектродной среде с последующей финишной обработкой поверхностным пластическим деформированием обкатыванием.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 18296-72. Обработка поверхностным пластическим деформированием. Термины и определения. Москва: Издательство стандартов, 1973. 10 с.
2. Кочетков, А. В. Обзор исследований отделочно-упрочняющей обработки методом поверхностного пластического деформирования / А. В. Кочетков, Ф. Я. Барац, И. Г. Шашков // Интернет-журнал Науковедение. 2013. № 4 (17). С. 37.
3. Смелянский, В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В. М. Смелянский. Москва: Машиностроение, 2002. 300 с.

4. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / Л. Г. Одинцов. Москва: Машиностроение, 1987. 328 с.
5. Жулдыбин, А. А. Перспективы применения электроискрового легирования на рабочих поверхностях деталей тележек локомотивов / А. А. Жулдыбин, А. А. Владимиров, А. И. Шаповалов // Транспортное машиностроение. 2025. № 9 (45). С. 28-37. – DOI 10.30987/2782-5957-2025-9-28-37.

REFERENCES

1. GOST 18296-72. Surface Working. Terms and Definitions. Moscow: Izdatelstvo Standardov; 1973.
2. Kochetkov AV, Barats FYa, Shashkov IG. Review of studies of fine-hardening treatment by surface plastic deformation. Naukovedenie. 2013;4(17):37.
3. Smelyansky VM. Mechanics of hardening of parts by surface plastic deformation. Moscow: Mashinostroenie; 2002.

4. Odintsov LG. Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation: handbook. Moscow: Mashinostroenie; 1987.
5. Zhuldybin AA, Vladimirov AA, Shapovalov AI. Prospects for the use of electric spark alloying on the working surfaces of locomotive bogie parts. Transport Engineering. 2025;9:28-37. DOI 10.30987/2782-5957-2025-9-28-37.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глушко, С.П. Исследование технологии электроискрового нанесения покрытий, легирования и упрочнения / С.П. Глушко // Advanced Engineering Research. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 253–259. <https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259>.
2. Ким, В. А. Газовая среда – фактор упрочнения при электроискровом легировании / В. А. Ким, Д. Н. Коротаев // Электронная обработка материалов. Кишинев. – 1998. – С. 37–43.
3. Коротаев Д.Н. Создание износостойких покрытий электроискровым легированием в окислительных и инертных средах с оптимизацией режимов и использованием твердосплавных элект-

родов: специальность 05.02.01: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Коротаев Дмитрий Николаевич. – Омск, 2009. – 302 с.

4. Коротаев, Д.Н. Влияние газовых сред на технологические возможности электроискрового легирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / Коротаев Дмитрий Николаевич. Благовещенск, 1998. – 203 с.: ил.
5. Мулин, Ю. И. Особенности образования износостойких покрытий при механизированном процессе электроискрового легирования / Ю. И. Мулин, Д. В. Ярков // Электронная обработка материалов. – 2004. – № 5. – С. 7–13.

BIBLIOGRAPHIC LIST

1. Glushko SP. Investigation of the electrospark coating, alloying and strengthening technology. Advanced Engineering Research [Internet]. 2021;21(3):253-259. Available from:

<https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-3-253-259>.

2. Kim VA, Korotaev DN. Gaseous medium is a hardening factor in electric spark alloying. Electronic

- Processing of Materials. 1998:37-43.
3. Korotaev DN. Making wear-resistant coatings by electric spark alloying in oxidizing and inert media with mode optimization and the use of hard alloy electrodes [dissertation]. [Omsk (RF)]; 2009.
 4. Korotaev DN. Influence of gaseous media on the

technological possibilities of electric spark alloying [dissertation]. [Blagoveshchensk (RF)]; 1998.

5. Mulin YuI, Yarkov DV. Features of forming wear-resistant coatings during the mechanized process of electric spark alloying. *Electronic Processing of Materials*. 2004;5:7-13.

Информация об авторах:

Жулдыбин Андрей Аркадьевич – аспирант кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, тел. +79124821236.

Владимиров Александр Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, международные идентификационные номера автора: Scopus-Author ID 57214578618,

Zhuldybin Andrey Arkadyevich – Postgraduate student of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht, phone: +79124821236,

Vladimirov Aleksandr Andreevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht,

Research- ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID-РИНЦ 818516, тел. +79205605185.

Шаповалов Антон Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования в металлургии и машиностроении им. В.Б. Крахта, международные идентификационные номера автора: Author-ID-РИНЦ 477668, тел. +79038843784.

Scopus-Author ID 57214578618, Research-ID-Web of Science AAW-8223-2020, Author-ID-RSCI 818516, phone: +79205605185.

Shapovalov Anton Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment in Metallurgy and Mechanical Engineering named after V.B. Krakht, Author-ID-RSCI 477668, phone: +79038843784.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.

Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 22.11.2025; одобрена после рецензирования 09.12.2025; принята к публикации 27.01.2026. Рецензент – Сьянов С.Ю., кандидат технических наук, доцент Брянского государственного технического университета, заместитель главного редактора журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 22.11.2025; approved after review on 09.12.2025; accepted for publication on 27.01.2026. The reviewer is Syanov S.Yu., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University, Deputy Editor-in-Chief of the journal *Transport Engineering*.