

PACSnumbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 68.55.Ln, 81.15.Rs, 81.65.Lp, 81.40.Pq

**Повышение качества поверхностных электроэрозионно-
легированных слоёв комбинированными покрытиями
и поверхностным пластическим деформированием.
I. Особенности формирования комбинированных
электроэрозионных покрытий на специальных сталях и сплавах**

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова*, Е. В. Коноплянченко,
В. С. Марцинковский, Н. В. Тарельник, О. А. Василенко

*Сумский национальный аграрный университет,
ул. Герасима Кондратьева, 160,
40021 Сумы, Украина*

**Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2,
40007 Сумы, Украина*

В работе представлен анализ особенностей формирования комбинированных эрозионных покрытий (КЭП) на конструкционных, инструментальных сталях и никелевых сплавах. Предложен новый способ формирования КЭП, заключающийся в нанесении промежуточного слоя из меди между основным металлом и покрытием из износостойких сплавов. Высокими показателями качества характеризуются квазимного-слойные покрытия, сформированные методом электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) в последовательности ВК8 → Cu → ВК8 для стальных подложек, ВК8 → ВК8 → Cu и ВК8 → ВК8 → Ni — для никелевого сплава ХН58МБЮД. Высокие результаты по микротвёрдости (14200

Corresponding author: Viacheslav Borysovych Tarelnyk
E-mail: tarelnik@i.ua

*Sumy National Agrarian University,
160 Gerasym Kondratiev Str., UA-40021 Sumy, Ukraine*

**Sumy State University, 2 Rymsky-Korsakov Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

Citation: V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskyy, N. V. Tarelnyk, and O. O. Vasylenko, Improvement of Quality of the Surface Electroerosive Alloyed Layers by the Combined Coatings and the Surface Plastic Deformation. I. Features of Formation of the Combined Electroerosive Coatings on Special Steels and Alloys, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **41**, No. 1: 47–69 (2019) (in Russian), DOI: [10.15407/mfint.41.01.0047](https://doi.org/10.15407/mfint.41.01.0047).

МПа) получены при ЭЭЛ стали 45 и Р6М5 композиционным электроэрозионным материалом 90% ВК6 + 10% 1М.

Ключевые слова: электроэрозионное легирование, электроды, комбинированное покрытие, пластическая деформация, структура, микротвёрдость.

У роботі представлено аналізу особливостей формування комбінованих ерозійних покриттів (КЕП) на конструкційних, інструментальних сталях і ніклевих стопах. Запропоновано новий спосіб формування КЕП, що полягає в нанесенні проміжного шару з міді між основним металом і покриттям зі зносостійких стопів. Високими показниками якості характеризуються квазибагатошарові покриття, сформовані методом електроерозійного легування (ЕЕЛ) в послідовності ВК8 → Cu → ВК8 для сталевих підкладинок, ВК8 → ВК8 → Cu і ВК8 → ВК8 → Ni — для нікелевого стопу ХН58МБЮД. Високі результати за микротвердістю (14200 МПа) одержано на сталях 45 і Р6М5 при ЕЕЛ композиційним електроерозійним матеріалом 90% ВК6 + 10% 1М.

Ключові слова: електроерозійне легування, электроды, комбіноване покриття, пластична деформація, структура, микротвердість.

The analysis of peculiarities of formation of the combined erosion coatings (CECs) on the structural and tool steels as well as nickel alloys is presented in this paper. New method of the CECs formation is proposed. It consists in applying an intermediate layer of copper between the base metal and the coating from wear-resistant alloys. Quasi-multilayer coatings formed by electroerosive alloying (EEA) in the sequences VK8 → Cu → VK8 on steels, VK8 → VK8 → Cu and VK8 → VK8 → Ni on nickel alloy KhN58MBUD are characterized by high quality factors. High microhardness (14200 MPa) is obtained on steel 45 and R6M5 by means of the EEA with composite electroerosive material 90% VK6 + 10% 1M.

Key words: electroerosive alloying, electrodes, combined coating, plastic deformation, structure, microhardness.

(Получено 11 ноября 2018 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

Выход из строя деталей машин, находящихся в контакте в процессе эксплуатации, является следствием физического износа разных видов: усталостных разрушений, ползучести материалов, механического износа, коррозии, эрозии, кавитации, старения материала и др.

Современная упрочняющая технология располагает многочисленными методами улучшения структуры и свойств поверхностного слоя деталей, каждый из которых имеет оптимальные области применения, достоинства и недостатки.

Для упрочнения и нанесения защитных покрытий весьма перспективным является метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ). К его основным особенностям следует отнести: локальную обработку поверхности; высокую прочность сцепления нанесённого материала с основой; отсутствие нагрева детали в процессе обработки; возможность использования в качестве обрабатываемых материалов, как чистых металлов, так и их сплавов, металлокерамических композиций, тугоплавких соединений и т.п.; диффузионное обогащение поверхности катода (детали) составными элементами анода (электрода) без изменения размеров детали; отсутствие необходимости специальной подготовки поверхности. Несмотря на то, что ЭЭЛ положительно влияет на износостойкость поверхностного слоя, его недостатки (изменение шероховатости поверхности, неравномерность поверхностного упрочнения, отрицательное влияние эрозионного разряда на усталостные свойства изделий и др.) нередко ограничивают применение данной технологии для широкого круга деталей машин.

Устранить вышеперечисленные недостатки можно как технологическими приёмами — применением комбинированных электроэрозионных покрытий (КЭП), так и сочетанием ЭЭЛ с другими методами упрочнения, например, поверхностным пластическим деформированием (ППД), применяемым для повышения надёжности и долговечности деталей машин. ППД всё шире используется для повышения качественных параметров поверхностного слоя: увеличения глубины упрочнения; снижения шероховатости; повышения твёрдости и износостойкости; увеличения сопротивления схватыванию и повышения усталостной прочности.

Очевидно, применение ППД в сочетании с предварительным ЭЭЛ поверхностного слоя представляет особый интерес, так как данные технологии взаимно дополняют друг друга. Использование такой комбинированной технологии (КТ) позволяет не только устранить все вышеперечисленные недостатки ЭЭЛ, но и значительно расширить область применения обеих технологий.

2. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В литературе практически отсутствуют сведения о структурообразовании поверхностного слоя при нанесении (многослойных) ЭЭЛ покрытий, сочетающих в себе твёрдые износостойкие и мягкие антифрикционные материалы.

Известны способы, заключающиеся в нанесении двух и более слоёв [1, 2]. Так, целью метода, представленного в [1], является повышение производительности процесса за счёт увеличения коэффициента переноса материала при нанесении покрытий из

твёрдых сплавов, для чего на поверхности детали формируют промежуточный слой из поверхностно-активного металла (ПАМ). В качестве ПАМ могут быть использованы любые известные поверхностно-активные металлы (например, эвтектики Sn–Zn, Cd–Zn, легкоплавкий металл Sn). Покрытия с использованием ПАМ обладают повышенной адгезионной прочностью, что особенно важно для деталей, работающих при знакопеременных циклических нагрузках.

В [3] нами, с целью разработки технологии упрочнения штоков серёг компрессоров (материал 07X16H6), работающих в паре с кольцами из фторопласта (материал 4К-20), при возвратно-поступательном движении с нагрузкой 400 МПа в условиях ограниченной смазки, был предложен новый способ нанесения КЭП.

Новый способ [4] заключается в том, что сначала, методом ЭЭЛ, на «мягких» режимах наносится слой покрытия из легкоплавкого антифрикционного металла, выбираемого из группы: индий, олово, кадмий, свинец. Затем на более «грубом» режиме на полученное покрытие наносится слой износостойкого, высоко-твёрдого металла или его карбида, выбираемого из группы: титан, ванадий, вольфрам.

Данный порядок нанесения слоёв покрытия способствует расплавлению первоначально нанесённого технологического покрытия из легкоплавкого металла при нанесении второго слоя, заполнению им микрошероховатостей и пор основного покрытия. В результате шероховатость поверхности снижается до значений $R_a = 0,6–0,8$ мкм. Для сравнения, у однослойных покрытий из износостойких высокотвёрдых металлов шероховатость составляет $R_a = 2,8–3,5$ мкм. Одновременно повышается износостойкость поверхности. Долговечность штоков, упрочнённых обычным способом, оказывается в 3–4 раза ниже, чем при использовании предложенного метода.

Резервом технологии ЭЭЛ, применяемого для повышения несущей способности деталей машин, могут быть КЭП, позволяющие создавать на их поверхности структуры с заданными характеристиками [5]. С целью изучения механизма формирования поверхностных слоёв с КЭП нами были выполнены обширные экспериментальные исследования по послойному легированию различных металлических подложек (сталь 45, сплав ХН58МБЮД, быстрорежущая сталь Р6М5 и др.) электродами из твёрдых износостойких металлов и их карбидов, а также электродами из легкоплавких металлов в различной последовательности [6–8].

При ЭЭЛ стали 45 тугоплавкими износостойкими металлами Ti, V, W и их карбидами, а также легкоплавкими металлами Cd, In, Sn, Pb установлено следующее:

– исходная шероховатость образцов $R_a = 0,23$ мкм после нанесения покрытия Ti, V, W увеличивается соответственно до 2,82,

3,22 и 3,2 мкм;

– при последующей обработке электродом одного из легкоплавких металлов шероховатость поверхности меняется незначительно;

– при нанесении сначала в качестве технологического покрытия одного из легкоплавких металлов (Cd, In, Sn, Pb) с последующим нанесением основного покрытия из износостойкого тугоплавкого металла наблюдается резкое снижение шероховатости поверхности до $R_a = 0,54-0,91$ мкм. Аналогичные результаты по снижению шероховатости обеспечиваются и тогда, когда в качестве технологического покрытия используется мягкий антифрикционный металл — медь.

Для устранения факторов, снижающих эксплуатационные свойства упрочнённых ЭЭЛ слоёв, часто используют поверхностную пластическую деформацию, с помощью которой можно не только повысить несущую способность деталей машин и снизить их материалоемкость, но и широко регулировать свойства поверхностного слоя [9, 10].

Достаточное количество работ посвящено применению ППД предварительно упрочнённых поверхностей [11–13], что приводит к перераспределению остаточных напряжений. Исследованию закономерностей пластического деформирования термически или химико-термически упрочнённых поверхностей посвящены работы отечественных и зарубежных учёных [14, 15].

Определённый интерес представляет ППД деталей, упрочнённых плазменными покрытиями. Так, обработка плазменных покрытий с твёрдостью HRC 40–60 на основе железа с никелем легирующими элементами существенно снижает величину остаточных напряжений растяжения с формированием сжимающих напряжений до 150–220 МПа и в целом позволяет повысить долговечность деталей на 20–35% [16]. Важными параметрами, влияющими на усталостные характеристики, являются порядок и вид напыляемых порошков, наличие и толщина подслоя, общая толщина напылённого слоя, предварительный разогрев подложки, остаточные напряжения, возникающие при обработке. С ростом толщины покрытия повышаются растягивающие остаточные напряжения [17, 18].

Обработка поверхности после предварительного ЭЭЛ имеет определённые особенности. В связи с относительно небольшой толщиной слоёв (десятки микрометров), формируемых при ЭЭЛ, последующая шлифовка их с целью снижения шероховатости поверхности в ряде случаев затруднена или вообще неприемлема. Снизить шероховатость поверхности, снять остаточные растягивающие напряжения позволяет обкатка шариком (ОШ) [19, 20]. После такой обработки электроэрозионных покрытий макронапряжения

становятся сжимающими, а их величина мало зависит от усилий обкатки. Это свидетельствует о том, что в процессе обкатки покрытий происходит пластическое течение материала слоя [20, 21].

Одним из эффективных методов финишной обработки деталей ППД является алмазное выглаживание (АВ), которое, в отличие от обкатки шариком или роликом, позволяет обрабатывать детали с весьма высокой твёрдостью [6, 22, 23]. Применение алмаза сферической формы в качестве инструмента позволяет обеспечить локальное пластическое деформирование, снизить шероховатость поверхности и уменьшить волнистость и пористость [17].

В [24] приводится анализ напряжённо-деформированного состояния в очаге деформации для однородных материалов с учётом пластической твёрдости, как степени его упрочнения, результаты которого позволяют обоснованно назначать технологические режимы ППД, обеспечивающие требуемую структуру, свойства и шероховатость поверхностного слоя.

Нами ранее [3] по результатам экспериментальных исследований влияния основных технологических параметров ППД на микрогеометрию, структуру и свойства ЭЭЛ слоёв выявлено, что эффективность ППД, как метода улучшения шероховатости поверхности, зависит от удельного усилия обкатки и способа ЭЭЛ; найдены зависимости твёрдости поверхностных слоёв от удельного усилия деформации; получено, что наиболее рациональными режимами удельных усилий ППД для покрытий из твёрдых износостойких материалов являются 1000 МПа для АВ и 1500 МПа для ОШ.

Кроме того, изучение влияния ППД на величину и знак остаточных напряжений, и величину усталостной прочности позволило установить, что деформация покрытий, одновременно с повышением износостойкости, изменяет неблагоприятные растягивающие напряжения, образованные при ЭЭЛ хромом на глубине до 0,2 мм, в сжимающие, которые полностью нейтрализуют последние. Предел выносливости натуральных моделей из стали 45 после ЭЭЛ хромом снижается по сравнению с образцами, обработанными ТВЧ, более чем в 2 раза, а применение ППД покрытия ОШ и АВ повышает σ^{-1} до стандартного уровня. Следует подчеркнуть, что в работе исследования проводились с использованием в качестве материалов электродов твёрдых износостойких материалов.

Наибольший интерес, на наш взгляд, представляет работа [25], в которой в результате проведённых исследований поверхностных слоёв, сформированных в процессе ЭЭЛ железа, меди и титана и последующего ППД при нагрузках на шарик 40–150 кгс, получены следующие результаты: в упрочнённом методом ЭЭЛ слое исследованных металлов формируется плотность дислокаций 10^{15} – 10^{16} м⁻², при этом для железа и титана эта плотность приближается к критической; выявлено существенное влияние энергетиче-

ских режимов ЭЭЛ на формирование параметров субструктуры; определено, что наиболее значимым изменениям подвергается дисперсность блоков, величины же микродеформаций (после ЭЭЛ) незначительны и слабо зависят от режимов обработки.

Имеющиеся к настоящему времени работы не содержат, к сожалению, конкретных, проверенных экспериментом или вытекающих из него рекомендаций по определению величины ожидаемых деформаций покрытий из мягких антифрикционных металлов или комбинированных электроэрозионных покрытий (КЭП), получаемых поочерёдным нанесением мягких антифрикционных и твёрдых износостойких материалов в различной последовательности.

Кроме того, в литературе отсутствуют сведения о структуре КЭП, подвергаемых последующей или предварительной обработке ППД, влиянию такой технологии упрочнения на износостойкость и другие свойства изделий. Это обстоятельство говорит о необходимости проведения широкого комплекса экспериментальных и теоретических исследований, направленных на выявление отдельного влияния различных факторов на качественные параметры поверхностного слоя, так как даже самое успешное решение задачи об упругопластическом деформировании упрочнённого ЭЭЛ слоя не может явиться надёжным инструментом для достоверного определения ожидаемого поведения материала слоя при ППД.

Таким образом, целью работы является обеспечение требуемого качества поверхностных слоёв деталей за счёт совершенствования ЭЭЛ и направленного сочетания его с технологиями ППД, что позволяет в значительной мере реализовать методологию управления качеством поверхностных слоёв наиболее ответственных деталей при изготовлении и ремонте машин.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выявление зависимости качественных характеристик КЭП, сформированных методом ЭЭЛ, от технологических параметров процесса;
- разработка общего подхода к комбинации технологий ЭЭЛ, формирующих поверхностные слои различной твёрдости и ППД на основе анализа напряжённо-деформированного состояния;
- установление влияния ППД слоёв из мягких антифрикционных материалов и КЭП, полученных технологиями ЭЭЛ, на микрогеометрию, структуру, остаточные напряжения, усталостную прочность, другие свойства сформированных поверхностных слоёв и разработкой на этой основе комбинированных технологий;
- разработка принципов управления качеством поверхностных слоёв комбинированными технологиями.

3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полярный перенос материала анода на поверхность катода осуществляется в условиях высоких температур, давлений и сопровождающих их структурных и фазовых превращений, диффузионных процессов, термических напряжений, т.е. более сложных физических явлений, определяющих конечные результаты ЭЭЛ. Следовательно, исследование и анализ процессов, происходящих на электродах, позволяет получить не только общую физическую картину ЭЭЛ, но и оценить его технологические возможности, а также найти новые области применения.

Исследование покрытий в зависимости от режима ЭЭЛ и материалов анода (электрода) и катода (детали), проводилось на стационарной и переносной установках с ручным вибратором (рис. 1). Установки различаются исполнением и не отличаются режимами работы. Основные режимы их работы приведены в табл. 1. Для ёмкостей накопительного конденсатора $C = 20$ мкФ и $C = 300$ мкФ установки имеют по 8 режимов работы.

Для проведения исследовательских работ по нанесению КЭП, использовалась механизированная установка «ЭИЛ-9» (рис. 1, б).

Установка содержит источник технологического тока (генератор) и электропривод с электродной головкой, монтируемой на токарно-винторезных станках. Допускаемые габаритные размеры восстанавливаемой поверхности обуславливаются моделью применяемого станка. Толщина наносимого в процессе ЭЭЛ слоя за один проход зависит от материала электрода, режима и времени обработки и может достигать 0,6 мм.

При ЭЭЛ на установке «ЭИЛ-9» не происходит искажений исходной геометрической формы упрочняемой детали. В процессе



Рис. 1. Оборудование ЭЭЛ: *а* — стационарная и расположенная на ней переносная установка с ручным вибратором моделей «УИЛВ-8» и «УИЛВ-8А» соответственно; *б* — механизированная установка модели «ЭИЛ-9».

Fig. 1. Equipment for EEA: *a*—stationary and portable installation with a manual vibrator (models ‘UILV-8’ and ‘UILV-8A’, respectively); *б*—mechanized installation of the model ‘EIL-9’.

ТАБЛИЦА 1. Режимы работы установок ЭЭЛ «УИЛВ-8» и «УИЛВ-8А».
TABLE 1. Working regimes of the EEA units ‘UILV-8’ and ‘UILV-8A’.

Номер режима	Напряжение холостого хода U_{xx} , В	Сила тока короткого замыкания $J_{кз}$, А		Время легирования t , мин		Мощность разряда N_p , Вт	
		С, мкФ		С, мкФ		С, мкФ	
		C = 20	C = 300	C = 20	C = 300	C = 20	C = 300
1	38,5	0,2–0,4	1,0–1,4	7–8	4–5	11,5	48,1
2	48,2	0,4–0,5	1,4–1,6	7–8	3–4	21,7	72,3
3	56,1	0,5–0,6	1,6–2,0	6–7	3–4	30,9	101,0
4	62,8	0,6–0,7	1,8–2,0	5–6	2–3	40,8	119,3
5	68,7	0,7–0,8	2,0–2,2	4–5	1–2	51,5	144,3
6	73,6	0,8–0,9	2,2–2,4	4–5	1–1,5	62,6	169,3
7	78,6	0,9–1,0	2,4–2,6	3–4	0,5–1	74,7	196,5
8	83,4	1,0–1,2	2,6–2,8	3–4	0,5–1	91,7	225,2

легирования температура нагрева детали не превышает 100°C. В качестве материала образцов использовались стали 45, 40Х, а в качестве электродов — металлокерамические твёрдые сплавы типа ВК и ТК, а также медь и др. Исследовательские работы по нанесению КЭП выполнялись на цилиндрических образцах Ø 50 мм и длиной 200 мм.

Режим легирования выбирался в соответствии с рекомендациями табл. 2.

Для исследования структуры и измерения микротвёрдости поверхностного слоя использовали шлифы образцов после ЭЭЛ. Поверхность шлифа была ориентирована перпендикулярно к поверхности электроэрозионного упрочнения. Перед изготовлением шлифа для исключения краевого эффекта при легировании торец образца фрезеровали на глубину не менее 2 мм. Для предупреждения скалывания слоя, завалов края образец крепили с контр-

ТАБЛИЦА 2. Зависимость силы рабочего тока генератора и сечения электрода от требуемой толщины наносимого слоя.

TABLE 2. Dependence of generator operating current and electrode cross-section on the required thickness of layer.

Наименование	Значение		
Толщина наносимого покрытия (на диаметр) за один проход, мм	0,1–0,2	0,2–0,3	0,3–0,4
Рабочий ток, А	0–10	10–20	20–30
Сечение электродов, мм ²	3–5	5–7	7–10

телом в струбцине. Затем шлиф подвергался химическому травлению для выявления структуры в реактиве в соответствии с материалом основы.

После изготовления шлифы исследовали на оптическом микроскопе «Неофот-2», с использованием которого проводилась оценка качества слоя, его сплошности, толщины и строения зон подслоя — диффузионной зоны и зоны термического влияния. Также проводился дюрOMETрический анализ на распределение микротвёрдости в поверхностном слое и по глубине шлифа от поверхности. Замер микротвёрдости проводили на микротвердомере ПМТ-3 вдавливанием алмазной пирамиды под нагрузкой 0,05 Н. Кроме того, на некоторых образцах проводилась оценка микротвёрдости в плоскости легирования после многократного сошлифовывания поверхности.

Используемые для исследований материалы анода (легирующего электрода) и катода (детали), а также некоторые их физико-механические свойства представлены в табл. 3, 4.

Большинство экспериментов проводилось с использованием в качестве материала катода стали 45, как наиболее распространённой и являющейся представителем конструкционных сталей для изготовления деталей машин. Эта среднеуглеродистая нелегированная сталь применялась для исследований в термоулучшенном состоянии с твёрдостью основы 280 НВ и сорбитной структурой. Кроме этого, сталь 45 использовалась в качестве образцов для изучения влияния ЭЭЛ и поверхностной пластической

ТАБЛИЦА 3. Режимы обработки и физико-механические свойства материалов, применяемых при ЭЭЛ в качестве катода (детали).

TABLE 3. Process conditions and physicommechanical properties of materials used in EEA as a cathode (parts).

Марка материала	Вид обработки	Предел прочности при растяжении, кг/мм ²	Предел текучести, кг/мм ²	Твёрдость
Сталь 45	∅ 15мм, закалка, вода, отпуск 450°C	96,8	84,6	280 НВ
40Х	Закалка 860°C, масло, отпуск 500°C, вода	98,0	78,5	310–320 НВ
Сталь Р6М5	Закалка 1220°C, отпуск 560°C, 3 раза	–	–	64 HRC
ХН58МБЮД	Закалка 980°C, 1 ч; старение 730°C, 15ч воздух; старение 650°C, 10 ч, воздух	115	85	400 НВ

ТАБЛИЦА 4. Физико-механические свойства материалов, применяемых при ЭЭЛ в качестве анода.**TABLE 4.** Physicomechanical properties of materials used in EEA as an anode.

Марка материала	Температура плавления, °С	Твёрдость	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Коэффициент линейного расширения, 10^{-6} град ⁻¹
Твёрдый сплав ВК8	–	88,5 HRA	5,0	5,1
Твёрдый сплав Т15К6	–	90,2 HRA	12,5	5,6
Графит (С)	3747	3,06 HV	268	27
Хром	1860	52 HRA	88,6	6,2
Вольфрам	3480	65 HRA	150	4,3
Молибден	2620	55 HRA	138	5
Никель	1455	100 HB	67	13,2
Титан	1725	60 HRA	21,9	9,2
Медь	1084	88 HB	401	16,5
Серебро	817	25 HB	453	14,2
Олово	232	5 HB	59,8	22
Свинец	327	4 HB	35	28,5
Индий	157	0,9 HB	87	60,5

деформации на распределение и знак остаточных напряжений, проведения усталостных испытаний.

Топографический анализ, просмотр и съёмка наиболее характерных участков покрытия в плоскости, перпендикулярной нанесённому слою, осуществлялись с помощью растрового электронного микроскопа JOEL JSM-540, который позволяет формировать изображение объекта путём сканирования его поверхности электронным зондом (диаметром до 5–10 нм) при разных увеличениях.

Для исследования распределения элементов по глубине слоя проводился рентгеноспектральный микроанализ, основанный на регистрации характеристического рентгеновского излучения, возбуждённого электронным пучком, от присутствующих в микрообъёме химических элементов. При этом использовался электронный микроскоп-микроанализатор ISIS 300 Oxford Instruments.

Для исследований влияния ППД на шероховатость, микротвёрдость и другие свойства поверхностного слоя с КЭП изготавливали образцы из стали 45 и 40X ($D_{нар} = 50$ мм, $L = 200–250$ мм), по всей поверхности которых проводилось ЭЭЛ твёрдыми износостойкими (вольфрам, твёрдые сплавы группы ВК и ТК, сплавы ВНС-2, ВНС-5

и др.) и мягкими антифрикционными (медь, олово, бронза, латунь и др.) материалами в различной последовательности. Затем на каждом образце проводилось ППД методами АВ, ОШ, а в отдельных случаях при нанесении многослойных КЭП на механизированной установке «ЭИЛ-9» — роликом. Каждому режиму соответствовала дорожка на образце шириной 10–15 мм.

АВ выполнялось на токарном станке с помощью пружинно-гидравлического приспособления выглаживателями АСПК-3 с радиусом вершины $R = 3, 4$ мм в зависимости от твёрдости покрытия при скорости $V = 40\text{--}80$ м/мин, усилия выглаживания $P = 60\text{--}350$ Н и подаче $S = 0,02\text{--}0,07$ мм/об. ОШ проводилась на токарном станке пружинно-штоковым приспособлением с шариковыми головками $\varnothing 10$ и $\varnothing 19$ мм. Максимальное усилие обкатки для шарика $\varnothing 10$ мм — 1200 Н, а для $\varnothing 19$ мм — 3000 Н. Подача $S = 0,05\text{--}0,21$ мм/об, скорость $V = 30$ м/мин. Смазка производилась индустриальным маслом. Обкатка роликом производилась на токарном станке пружинно-штоковым приспособлением с $D_p = 40$ и 50 мм и профильным радиусом $r = 3, 4$ и 5 мм.

После упрочнения ППД из каждого образца с каждой дорожки вырезались сегменты, из которых, в свою очередь, изготавливались шлифы для проведения металлографических исследований структуры упрочнённого слоя, микротвёрдости, сплошности и т.п.

Исследование осевых остаточных напряжений, являющихся наиболее опасными для валов, проводили на призматических образцах из стали 45 размером $70 \times 5 \times 2$ мм³ по методике И. А. Биргера путём послойного электрополирования напряжённых слоёв на установке типа «Пион».

По результатам исследования строились графики распределения остаточных напряжений по глубине для образцов различных серий. В каждой серии исследовалось не менее трёх образцов. Составление поверхностного слоя при исследовании остаточных напряжений определялось для следующих серий: ЭЭЛ Cu; ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr; ЭЭЛ Cu + ППД; ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr + ППД.

Следует отметить, что ЭЭЛ медью и хромом производилось на установке с ручным вибратором «УИЛВ-8» при $N_p = 30,9$ Вт и 144,3 Вт соответственно. ППД покрытия из меди производилось ОШ $\varnothing 19$ мм с усилием 500 Н, а КЭП ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr — ОШ $\varnothing 19$ мм с усилием 1500 Н.

Усталостные испытания проводили на машине УП-50 на базе 10^6 циклов. Для определения предела выносливости были изготовлены натурные образцы из стали 45 с рабочим диаметром 50 мм. Методика исследований достаточно подробно описана в [26].

Предел выносливости определялся с точностью 10 МПа для следующих серий: ЭЭЛ Cu; ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr; ЭЭЛ Cu + ППД; ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr + ППД.

ЭЭЛ медью и хромом производилось на установке «УИЛВ-8» при $N_p = 30,9$ Вт и $144,3$ Вт соответственно. ППД покрытия из меди производилось ОШ $\varnothing 19$ мм с усилием 500 Н, а КЭП ЭЭЛ Cu + ЭЭЛ Cr — ОШ $\varnothing 19$ мм с усилием 1500 Н.

4. АНАЛИЗ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЁВ С КЭП

Учитывая то, что наиболее стабильные результаты по массопереносу обеспечиваются при ЭЭЛ металлических поверхностей медью [27], металлографические исследования по определению влияния количества мягкой составляющей в КЭП на микротвёрдость поверхностного слоя проводились с использованием в качестве технологического подслоя из меди.

На рисунке 2 изображены микроструктуры поверхностного слоя стали 45 с КЭП, сформированными в последовательности Cu → ВК8 (а) и ВК8 → Cu (б).

Лучшими показателями по шероховатости и микротвёрдости поверхностного слоя обладают КЭП с подслоем из меди и основного покрытия из твёрдого сплава ВК8, нанесённых, соответственно, при мощности разряда $N_p = 30,9$ и $144,3$ Вт (табл. 4). Металлографические исследования КЭП, сформированных по предлагаемому способу, показывают, что их микротвёрдость находится на сравнительно высоком уровне (8400 – 12300 МПа) [28].

Следует отметить, что сверху покрытия находится плёнка меди толщиной 1 – 2 мкм. Наличие меди как на поверхности, так и по глубине покрытия подтверждается рентгеноспектральным анализом. При этом шероховатость поверхности снижается до $R_a = 0,5$ – $0,9$ мкм. В процессе кристаллизации образуется структура типа механической смеси с частичным образованием твёрдого раствора.

При нанесении первоначально тугоплавкого покрытия, а затем меди, микротвёрдость поверхностного слоя невелика ($H_\mu = 2300$ – 2500 МПа). Глубина распространения слоя с такой микротвёрдостью — до 30 мкм. Затем, по мере углубления, находится слой толщиной 5 – 10 мкм с более высокой микротвёрдостью ($H_\mu = 8000$ – 12300 МПа) и далее — переходная зона с микротвёрдостью $H_\mu = 3300$ – 4300 МПа. Изредка на поверхности покрытия встречаются участки с высокой микротвёрдостью (до $H_\mu = 11500$ МПа). Шероховатость таких КЭП достигает $2,4$ мкм.

С целью расширения области применения, а также улучшения качественных характеристик формируемых поверхностных слоёв, исследовались квазимногослойные КЭП, сформированные в последовательности ВК8 → Cu → ВК8, при этом наиболее предпочтительным является КЭП, при котором первый и последний слой из твёрдого сплава ВК8 наносились при мощности разряда $N_p = 144,3$ Вт, а

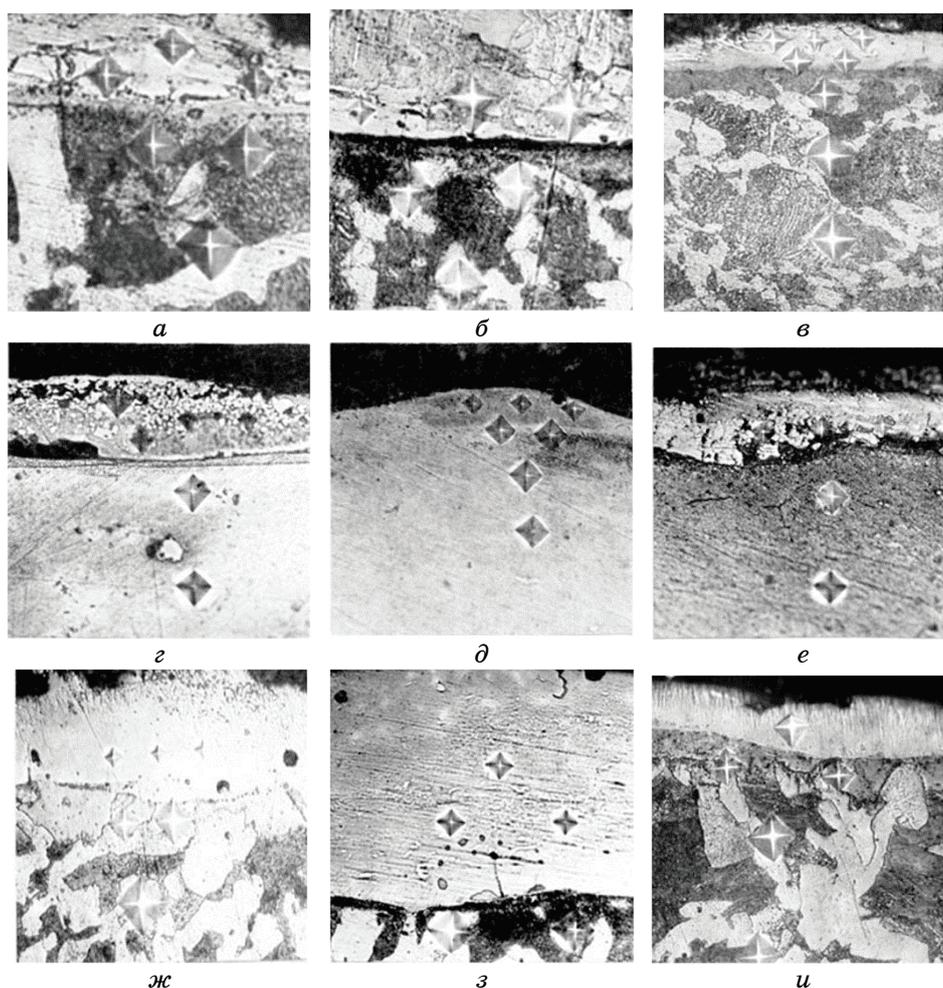


Рис. 2. Микроструктура поверхностного слоя стали 45 с КЭП: *a* — Cu + VK8; *б* — VK8 + Cu; *в* — VK8 + Cu + VK8; *г* — VK8 + VK8; *д* — VK8 + VK8 + Cu; *е* — VK8 + VK8 + Ni; *ж* — 10% 1М + 90% VK6; *з* — 100% 1М; *и* — Cu + 100% 1М; $\times 400$.

Fig. 2. Microstructure of the surface layer of steel 45 with CEC: *a*—Cu + VK8; *б*—VK8 + Cu; *в*—VK8 + Cu + VK8; *г*—VK8 + VK8; *д*—VK8 + VK8 + Cu; *е*—VK8 + VK8 + Ni; *ж*—10% 1М + 90% VK6; *з*—100% 1М; *и*—Cu + 100% 1М; $\times 400$.

промежуточный (медь) при $N_p = 101,0$ Вт (см. рис. 2 и табл. 4).

КЭП на образцах из никелевого сплава ХН58МБЮД, сформированные в последовательности Cu \rightarrow VK8 и VK8 \rightarrow Cu \rightarrow VK8, не обеспечивают желаемой микротвёрдости в поверхностном слое.

ТАБЛИЦА 5. Результаты металлографических исследований КЭП.

TABLE 5. Results of metallographic studies of CECs.

Последовательность нанесения покрытия	Толщина слоя, мкм	Микротвёрдость H_{μ} , МПа	Сплошность, %	Шероховатость R_a , мкм
Сталь 45				
Без покрытия	–	2800	–	0,23
Ti	15–20	10800	90	2,81
Ti + Cu	12–15	2500	100	2,80
Cu + Ti	10–12	10500	100	0,90
V	15–25	8500	90	3,19
V + Cu	15–20	2300	100	2,80
Cu + V	12–15	8400	100	0,80
W	15–25	9500	90	3,26
W + Cu	15–20	2500	100	3,14
Cu + W	12–15	9500	100	0,65
TiC	15–20	12000	90	3,07
TiC + Cu	12–15	2500	100	2,91
Cu + TiC	10–12	12000	100	0,82
VC	15–20	10000	90	3,16
VC + Cu	12–15	2400	100	2,80
Cu + VC	10–12	10500	100	0,62
WC	15–25	12500	90	2,96
WC + Cu	15–20	2350	100	2,81
Cu + WC	12–15	12300	100	0,48
In + WC	12–15	1970	100	0,52
Pb + WC	12–15	2600	100	0,56
Cd + WC	12–15	2300	100	0,77
Sn + WC	12–15	2000	100	0,59
ВК8 + Cu + ВК8	20–30	8740	100	0,50
90% ВК6 + 10% 1М	до 40	14200	80	4,2
100% 1М	40–75	8350	60	3,5
Cu + 100% 1М	до 40	6030	80	0,7
Никелевый сплав ХН58МБЮД				
Cu + ВК8	10–12	3300–3700	90	0,6
ВК8 + Cu + ВК8	10–15	3300–3700	100	0,6
ВК8 + ВК8	10–20	9270–9850	100	1,6
ВК8 + ВК8 + Cu	15–20	8740–9270	100	0,8
ВК8 + ВК8 + Ni	15–25	до 9850	100	1,0
Быстрорежущая сталь Р6М5				
100% 1М	50–75	11500	90	3,5
90% ВК6 + 10% 1М	20–30	14200	85	4,2
In + 100% 1М	10–15	12250	90	0,6
In+(90% ВК6+10% 1М)	15–20	13250	90	0,9

Положительные результаты при упрочнении никелевого сплава

ХН58МБЮД получены при формировании КЭП в последовательности: ВК8 → ВК8 → Cu и ВК8 → ВК8 → Ni, когда первый слой наносится при $N_p = 144,3$ Вт, а второй и третий из меди или никеля при $N_p = 30,9$ Вт (рис. 2, табл. 5).

С целью применения в качестве электродов при ЭЭЛ новых композиционных износостойких материалов, полученных с помощью порошковой металлургии, исследовались материалы, состоящие из тонкодисперсной смеси 1М (70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В) и ВК6. Изготовленными таким образом электродами проводилось ЭЭЛ образцов из стали 45, 40Х и Р6М5 при $N_p = 144,3$ Вт. Результаты металлографических исследований представлены на рис. 2 и в табл. 5.

Наиболее предпочтительным является применение электродов из материала состава 90% ВК6 + 10% 1М, позволяющих формировать поверхностный слой с микротвёрдостью до 14000 МПа и более [5, 28]. Подслой из индия, снижая шероховатость покрытия (от $R_a = 3,5-4,2$ мкм до $R_a = 0,6-0,9$ мкм), незначительно снижает его микротвёрдость, но при этом она остаётся на достаточно высоком уровне (13250 МПа).

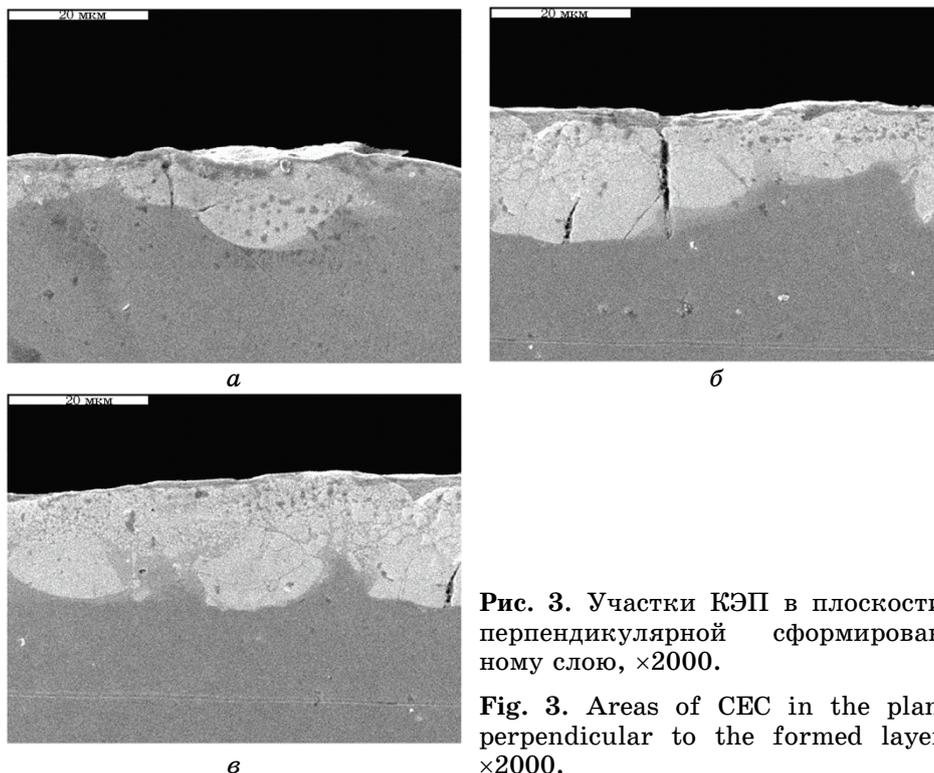


Рис. 3. Участки КЭП в плоскости, перпендикулярной сформированному слою, $\times 2000$.

Fig. 3. Areas of CEC in the plane perpendicular to the formed layer, $\times 2000$.

5. ИССЛЕДОВАНИЯ НА ЭЛЕКТРОННОМ МИКРОСКОПЕ

На рисунке 3 показаны наиболее характерные участки поверхностного слоя стали 40Х с КЭП состава ВК8 + Cu + ВК8 в плоскости, перпендикулярной покрытию.

Детальный анализ микрофотографий (рис. 3) показал, что сформированный ЭЭЛ слой пористый и имеет толщину 20–25 мкм.

Наличие в поверхностном слое пор обусловлено самой спецификой процесса ЭЭЛ. Кроме того, быстрое нагревание и мгновенное охлаждение, за счёт холодной подложки, приводит к образованию микротрещин как внутри слоя (рис. 3, а), так и с выходом на поверхность (рис. 3, б). Размеры пор и микротрещин изменяются от 0,01 до 1 мкм.

На рисунке 4 показан участок упрочнённого слоя в плоскости, перпендикулярной покрытию, и распределение в нём элементов.

Анализ распределения элементов в поверхностном слое, сформированном электродами из твёрдого сплава ВК8 и меди, в последовательности ВК8 → Cu → ВК8, показывает, что покрытие состоит из основного элемента твёрдого сплава — вольфрама и меди. Концентрация, как вольфрама, так и меди равномерная по всей глубине слоя.

В переходной зоне от покрытия к основе концентрация вольфрама и меди снижается. На том же участке плавно увеличивается концентрация железа. Это свидетельствует об интенсивном перемешивании и взаимной диффузии элементов подложки и покрытия.

На рисунке 5 показан участок профиля покрытия, нанесённого методом ЭЭЛ, и распределение в нём элементов, где в качестве материала легирующего электрода использовался сплав 1М состава — 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В.

В результате анализа структуры слоя (рис. 5), следует отметить её лучшее качество (снижение пористости, отсутствие трещин) в сравнении со структурой КЭП, сформированного в последовательности ВК8 → Cu → ВК8. Это объясняется характером и степенью взаимодействия материала легирующего электрода и подложки. Так, вольфрам, как основной компонент твёрдого сплава ВК8, не образует твёрдых растворов с железом, а никель и хром, как основные компоненты сплава 1М, неограниченно растворяются, соответственно, в γ -железе и α -железе. Толщина слоя на данном участке до 40 мкм.

Покрытие состоит из элементов легирующего электрода никеля, хрома и кремния. Бор не определялся. Кроме того, в покрытии отмечается повышение концентрации углерода. Это, очевидно, объясняется тем, что при ЭЭЛ в воздушной среде элементы металлов, которые входят в состав электродов, взаимодействуют

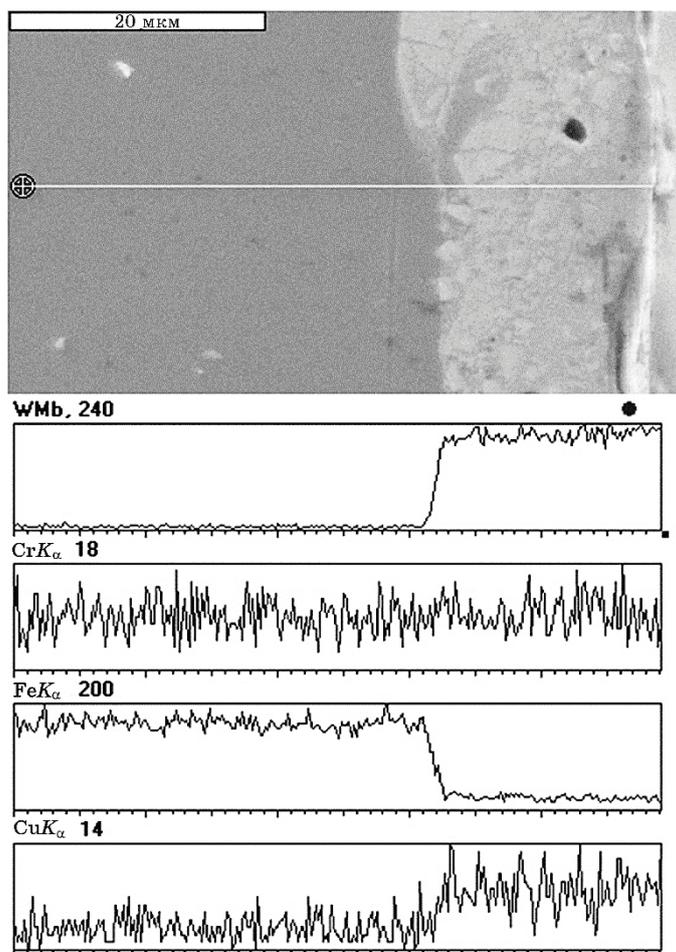


Рис. 4. Распределение элементов по глубине в КЭП, $\times 2000$.

Fig. 4. Distribution of elements by depth in CEC, $\times 2000$.

с углеродом воздуха и образуют в поверхностном слое карбиды.

В переходной зоне от покрытия к основе отмечается плавное снижение концентрации элементов покрытия и повышение концентрации железа, что свидетельствует о наличии диффузионной зоны.

6. ВЫВОДЫ

1. Предложен новый способ формирования КЭП, резко повышающий качество формируемых поверхностных слоёв (снижение

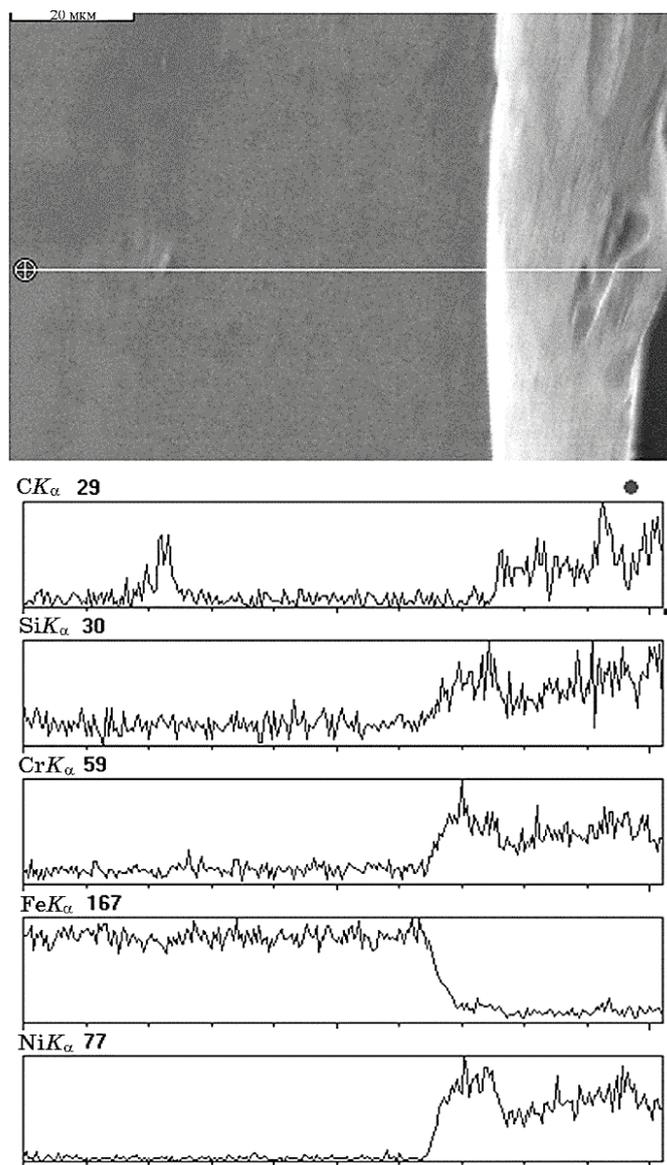


Рис. 5. Распределение элементов по глубине слоя в покрытии, сформированном электродом из сплава 1М, $\times 1000$.

Fig. 5. Distribution of elements in the depth of a layer in a coating formed by an electrode from 1M alloy, $\times 1000$.

шероховатости, пористости, увеличение сплошности и др.).

2. Металлографические исследования КЭП показали, что для

стальных подложек наиболее предпочтительным по качественным параметрам является квазимногослойное покрытие, сформированное в последовательности ВК8 → Cu → ВК8.

3. Положительные результаты (низкая шероховатость, высокая микротвёрдость и сплошность) при упрочнении никелевого сплава ХН58МБЮД обеспечиваются КЭП, сформированными в последовательности ВК8 → ВК8 → Cu и ВК8 → ВК8 → Ni, когда первый слой из твёрдого сплава ВК8 наносится по режимам $N_p = 144,3$ Вт, а второй и третий из меди или никеля при $N_p = 30,9$ Вт.

4. Наиболее высокие результаты по микротвёрдости (14200 МПа) получены при ЭЭЛ стали 45 и Р6М5 композиционным электроэрозионным материалом 90% ВК6 + 10% 1М, где 1М — 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В (% вес.).

5. Электронно-микроскопические исследования показали, что КЭП, сформированное электродами из твёрдого сплава ВК8 и меди в последовательности ВК8 → Cu → ВК8, состоит из основного элемента твёрдого сплава — вольфрама и меди. Концентрация как вольфрама, так и меди равномерна по всей глубине слоя.

6. В результате анализа структуры слоя при использовании многокомпонентного сплава 1М состава — 70% Ni, 20% Cr, 5% Si, 5% В отмечается значительное улучшение качества покрытия (снижение пористости, отсутствие трещин) в сравнении со структурой КЭП, сформированного в последовательности ВК8 → Cu → ВК8. Это объясняется характером и степенью взаимодействия материала легирующего электрода и подложки.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Чаругин, Г. Н. Мещеряков, *Способ формирования покрытий*, Авт. св. СССР № 1313610 (Опубл. 30.05.87).
2. В. А. Аникаев, А. И. Уршанский, В. К. Рыбаков, В. П. Ашихмин, Б. П. Кузнецов, Н. К. Махнев, А. В. Бородин, *Способ электроэрозионного легирования*, Авт. св. СССР № 1212722 (Опубл. 23.02.86).
3. В. Б. Тарельник, *Зміцнення поверхневих шарів інструмента та важконавантажених деталей електроерозійним легуванням з наступною пластичною деформацією* (Автореф. дис. к.т.н.) (Луганськ: ВНУ ім. В. Даля: 1994).
4. В. Б. Тарельник, Л. А. Иванов, В. Г. Марченко, *Способ электроэрозионного легирования*, Авт. св. СССР № 1734968 (Опубл. 23.05.92).
5. V. B. Tarel'nyk, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **55**: 9 (2017).
6. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 266 (2017).
7. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 385 (2017).

8. V. V. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 114 (2017).
9. Д. Д. Папшев, *Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным деформированием* (Москва: 1978).
10. И. В. Кудрявцев, *Вопросы прочности крупных деталей машин: Труды ЦНИИТМАШ. Кн. 112* (Москва: Машиностроение: 1976), с. 190.
11. Л. А. Хворостухин, В. Н. Машков, В. А. Торпачев, *Обработка металлопокрытий выглаживанием* (Москва: Машиностроение: 1980).
12. М. А. Балтер, М. Л. Туровский, Р. А. Новик, *Вестник машиностроения*, № 9: (1969).
13. М. А. Балтер, *Упрочнение деталей машин* (Москва: Машиностроение: 1978).
14. М. Л. Туровский, Р. А. Новик, *Вестник машиностроения*, № 1: 39 (1970).
15. J. Акаока, *Proc. Inst. Mechan. Engrs.*, No. 23 (1974).
16. Э. Б. Рыжов, Б. В. Бурькин, *Проблемы повышения качества, надёжности и долговечности машин*, № 3: 10 (1989).
17. В. К. Яценко, В. Ф. Притченко, И. Н. Комарчук, А. Г. Сахно, *Проблемы прочности*, № 5: 119 (1987).
18. А. А. Гузенков, А. Н. Поляков, Г. И. Логинов, *Проблемы прочности*, № 11 (1988).
19. А. И. Михайлюк, Л. С. Рапопорт, А. Е. Гитлевич, *Электронная обработка материалов*, № 1 (1991).
20. А. И. Михайлюк, Л. С. Рапопорт, А. Е. Гитлевич, *Электронная обработка материалов*, № 2: 17 (1991).
21. Л. Д. Брондз, *Вестник машиностроения*, № 11 (1977).
22. Л. А. Хворостухин, *Повышение надёжности и долговечности алмазным выглаживанием* (Москва: 1975).
23. В. К. Яценко, Г. З. Зайцев, В. Ф. Притченко, *Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием* (Москва: Машиностроение: 1985).
24. М. С. Дрозд, М. М. Матлин, Ю. И. Сидяков, *Инженерные расчёты упруго-пластической контактной деформации* (Москва: Машиностроение: 1986).
25. А. И. Михайлюк, А. Н. Иванов, Л. М. Капушкина, А. Е. Гитлевич, *Электронная обработка материалов*, № 1 (1995).
26. В. Б. Тарельник, *Комбинированные технологии электроэрозионного легирования* (Київ: Техніка: 1997).
27. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, № 12: 1611 (2016).
28. В. С. Марцинковский, В. Б. Тарельник, *Способ электроэрозионного легирования поверхностей стальных деталей*: Патент РФ № 2524471 (Опубл. 27.07.14).
29. В. С. Марцинковский, В. Б. Тарельник, *Способ нанесения износостойкого композиционного покрытия на изнашиваемые поверхности стальных изделий*: Патент РФ № 2598738 (Опубл. 27.09.16).

REFERENCES

1. N. V. Charugin and G. N. Meshcheryakov, *Sposob Formirovaniya Pokrytiy*: Authors' Certificate 1313610 SSSR (Publ. 30.05.87) (in Russian).

2. V. A. Anikayev, A. I. Urshanskiy, V. K. Rybakov, V. P. Ashikhmin, B. P. Kuznetsov, N. K. Makhnev, and A. V. Borodin, *Sposob Elektroerozionnogo Legirovaniya*: Authors' Certificate 1212722 SSSR (Publ. 23.02.86) (in Russian).
3. V. B. Tarel'nyk, *Zmitsnennyya Poverkhnevyykh Shariv Instrumenta ta Vazhkonavantazhenykh Detalej Elektroeroziynym Leguvannyam z Nastupnoyu Plastychnoyu Deformatsieyu* (Thesis of Dissert. for Ph.D.) (Luhans'k: VNU im. V. Dalya: 1994) (in Ukrainian).
4. V. B. Tarel'nyk, L. A. Ivanov, and V. G. Marchenko, *Sposob Elektroerozionnogo Legirovaniya*: Authors' Certificate 1734968 SSSR (Publ. 23.05.92) (in Russian).
5. V. B. Tarel'nyk, A. V. Paustovskii, Yu. G. Tkachenko, E. V. Konoplianchenko, V. S. Martsynkovskiy, and B. Antoszewski, *Powder Metall. Met. Ceram.*, **55**: 9 (2017).
6. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 266 (2017).
7. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 385 (2017).
8. V. B. Tarel'nik, V. S. Martsinkovskii, and A. N. Zhukov, *Chem. Petrol. Eng.*, **53**: 114 (2017).
9. D. D. Papshev, *Otdelochno-Uprochnyayushchaya Obrabotka Poverkhnostnym Deformirovaniem* (Moscow: 1978) (in Russian).
10. I. V. Kudryavtsev, *Voprosy Prochnosti Krupnykh Detaley Mashin: Trudy TsNIITMASH* (Moscow: 1976) (in Russian), p. 190.
11. L. A. Khvorostukhin, V. N. Mashkov, and V. A. Torpachev, *Obrabotka Metallopokrytiy Vyglazhivaniem* (Moscow: Mashinostroenie: 1980) (in Russian).
12. M. A. Balter, M. L. Turovskiy, and R. A. Novik, *Vestnik Mashinostroeniya*, No. 9 (1969) (in Russian).
13. M. A. Balter, *Uprochnenie Detaley Mashin* (Moscow: Mashinostroenie: 1978) (in Russian).
14. M. L. Turovskiy and R. A. Novik, *Vestnik Mashinostroyeniya*, No. 1: 39 (1970) (in Russian).
15. J. Akaoka, *Proc. Inst. Mechan. Engrs.*, No. 23 (1974).
16. E. B. Ryzhov and B. V. Burykin, *Problemy Povysheniya Kachestva, Nadezhnosti i Dolgovechnosti Mashin*, No. 3: 10 (1989) (in Russian).
17. V. K. Yatsenko, V. F. Pritchenko, I. N. Komarchuk, and A. G. Sakhno, *Problemy Prochnosti*, No. 5: 119 (1987) (in Russian).
18. A. A. Guzenkov, A. N. Polyakov, and G. I. Loginov, *Problemy Prochnosti*, No. 11 (1988) (in Russian).
19. A. I. Mikhaylyuk, L. S. Rapoport, and A. Ye. Gitlevich, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 1 (1991) (in Russian).
20. A. I. Mikhaylyuk, L. S. Rapoport, and A. Ye. Gitlevich, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 2: 17 (1991) (in Russian).
21. L. D. Brondz, *Vestnik Mashinostroyeniya*, No. 11 (1977) (in Russian).
22. L. A. Khvorostukhin, *Povyshenie Nadezhnosti i Dolgovechnosti Almaznym Vyglazhivaniem* (Moscow: 1975) (in Russian).
23. V. K. Yatsenko, G. Z. Zaytsev, and V. F. Pritchenko, *Povyshenie Nesushchey Sposobnosti Detaley Mashin Almaznym Vyglazhivaniem* (Moscow:

- Mashinostroenie: 1985) (in Russian).
24. M. S. Drozd, M. M. Matlin, and Yu. I. Sidiyakov, *Inzhenernye Raschety Uprugo-Plasticheskoy Kontaktnoy Deformatsii* (Moscow: 1986) (in Russian).
 25. A. I. Mikhaylyuk, A. N. Ivanov, L. M. Kapushkina, and A. Ye. Gitlevich, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 1 (1995) (in Russian).
 26. V. B. Tarel'nyk, *Kombinirovannye Tekhnologii Elektroerozionnogo Legirovaniya* (Kyiv: Tekhnika: 1997) (in Russian).
 27. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1611 (2016) (in Russian).
 28. V. S. Martsinkovskiy and V. B. Tarel'nyk, *Sposob Elektroerozionnogo Legirovaniya Poverkhnostey Stalnykh Detaley*: Patent 2524471 RF (Publ. 27.07.14) (in Russian).
 29. V. S. Martsinkovskiy and V. B. Tarel'nyk, *Sposob Naneseniya Iznosostoykogo Kompozitsionnogo Pokrytiya na Iznashivayemye Poverkhnosti Stalnykh Izdeliy*: Patent 2598738 RF (Publ. 27.09.16) (in Russian).