

PACS numbers: 68.55.J-, 68.55.Ln, 68.55.Nq, 81.15.Rs, 81.40.Pq, 81.65.Lp, 81.70.Jb

## **Исследование закономерностей процессов формирования поверхностных слоёв при электроэрозионном легировании. Часть I**

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова\*, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик

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

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

Получены зависимости массопереноса в тугоплавких металлах и сплавах (Cr, Ti, W, твёрдый сплав), а также металлах группы железа (Ni) при контактном и бесконтактном электроэрозионном легировании (ЭЭЛ) поверхностей из железа Армко, сталей 45 и 12X18H10T от длительности обработки. Проведены топографический анализ наиболее характерных участков поверхности и качественный рентгеновский микроанализ покрытия из износостойких и антифрикционных материалов. Исследовано влияние атмосферы процесса ЭЭЛ на фазовый состав слоя.

**Ключевые слова:** покрытие, электроэрозионное легирование, массоперенос, шероховатость, рентгеноструктурный анализ.

Одержано залежності масоперенесення в тяжкотопких металах і стопах (Cr, Ti, W, твердий стоп), а також металах групи заліза (Ni) при контактному та безконтактному електроерозійному легуванні (ЕЕЛ) поверхонь із заліза Армко, криць 45 і 12X18H10T від тривалості оброблення. Прове-

---

Corresponding author: Vyacheslav Borysovych Tarel'nyk  
E-mail: tarelnik@i.ua

Sumy National Agrarian University, 160 G. Kondratiev Str., 40021 Sumy, Ukraine  
\*Sumy State University, 2 Rymsky-Korsakov Str., 40007 Sumy, Ukraine

Please cite this article as: V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, Investigation of Regularities of the Processes of Formation of Surface Layers with Electroerosive Alloying. Part I, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 38, No. 12: 1611–1633 (2016), DOI: 10.15407/mfint.38.12.1611.

дено топографічну аналізу найбільш характерних ділянок поверхні та якісну рентгенівську мікроаналізу покриття зі зносостійких і антифрикційних матеріалів. Досліджено вплив атмосфери процесу ЕЕЛ на фазовий склад шару.

**Ключові слова:** покриття, електроерозійне легування, масоперенесення, шерсткість, рентгеноструктурна аналіза.

The dependences of mass transfer in refractory metals and alloys (Cr, Ti, W, hard alloy) as well as iron group metals (Ni) with contact and contactless electroerosive alloying (EEA) of surfaces by the Armco iron, 45 and 12Kh18N10T steels on treatment duration are obtained. Topographic analysis of the most typical surface areas along with high-quality x-ray microanalysis of the wear-resistant and antifriction coatings is carried out. Influence of the EEA process atmosphere on phase composition of the layer is studied.

**Key words:** coating, electroerosive alloying, mass transfer, roughness, x-ray diffraction analysis.

*(Получено 24 октября 2016; окончательный вариант — 4 ноября 2016 г.)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного машиностроения связано с применением новых прогрессивных технологических процессов, позволяющих повысить ресурс, надёжность машин и оборудования, обеспечить работоспособность деталей и инструментов в условиях динамических и статических контактных, силовых и тепловых нагрузок. В свою очередь, надёжность и ресурс современной техники в значительной степени зависят от работоспособности и срока службы деталей трибосистем, определяемых эксплуатационными свойствами материалов, из которых они изготовлены. Это инициирует как разработку новых, так и совершенствование уже известных технологий получения износостойких покрытий высокоэнергетической обработкой. К числу современных методов обработки поверхностей металлических деталей концентрированным потоком энергии относится электроэрозионное легирование (ЭЭЛ), позволяющее получать покрытия с уникальными физико-механическими и триботехническими свойствами [1, 2].

Метод ЭЭЛ относится к электрофизическим способам обработки материалов, основанным на использовании концентрированных потоков энергии, и может быть довольно перспективным для упрочнения и нанесения защитных покрытий. Он заключается в изменении свойств обрабатываемого материала в результате ионной бомбардировки, облучения и перевода в тело некоторого количества энергии. Изменения, происходящие под действием потоков излу-

чения, целесообразно использовать для технологической обработки, чтобы изменять размеры тела, химический состав поверхности, придавать материалу поверхностного слоя определённые свойства. Поэтому 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.

Процесс ЭЭЛ начинается со сближения анода (электрода) с катодом (деталью). При расстоянии между ними равном дистанции пробоя начинается развитие искрового разряда. После пробоя межэлектродного промежутка на поверхности образуются локальные очаги плавления и испарения, вызывающие электрическую эрозию материалов электродов (анода и катода). Преимущественный перенос эродируемого материала анода на катод обеспечивает формирование на нём изменённого поверхностного слоя, который при воздействии на него травителей, используемых для выявления микроструктуры материалов электродов, остаётся «белым», т.е. структура его не выявляется. Образование «белого» слоя происходит в условиях локального действия высоких температур и давлений, влияния дефектов структуры, мартенситного превращения [3]. Высокая скорость теплоотвода приводит к тому, что в пределах толщины слоя порядка нескольких микрометров температура быстро падает до температур плавления и соответствующих фазовых превращений. В связи с этим кристаллизация, фазовые превращения, диффузия и химическое взаимодействие, сопровождающие процесс ЭЭЛ, приводят к образованию крайне неравновесных структур с высокой гетерогенностью по составу, структуре и свойствам. Твёрдость такого слоя, как правило, значительно превосходит твёрдость материалов электродов. В нём действуют напряжения, превосходящие внутренние напряжения в материалах анода и катода [4, 5].

Характер взаимного распределения элементов в поверхностных слоях электродов при ЭЭЛ свидетельствует о высокой подвижности атомов в кристаллической решётке металлов, подвергнутых воздействию импульсных разрядов [6].

Анализ литературных источников показывает, что в качестве материала анода при ЭЭЛ сталей используют твёрдые сплавы марок ВК и ТК [7], чистые металлы и их сплавы [8, 9], композиционные материалы [10], синтетические твёрдые инструментальные материалы, изготовленные по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [11]. Иногда применяют многослойные электроэрозионные покрытия [12, 13]. Совершенствованию технологии ЭЭЛ уделяется большое внимание в Украине, а также в странах ближнего и дальнего зарубежья. Особый интерес представляет работа [14], в которой описан способ нанесения покрытий вращающимся электродом, а процесс ЭЭЛ происходит без соприкосновения

электрода с деталью.

Несмотря на большое число исследований, проведённых в области ЭЭЛ металлических поверхностей, до настоящего времени нет достаточно достоверных, подтверждённых экспериментом сведений о зависимости структурообразования поверхностного слоя сталей с различным содержанием углерода и степени легирования от типа установки, энергии разряда и времени легирования. В частности достаточно важным является установление корреляционных зависимостей между параметрами работы оборудования и качественными параметрами сформированных покрытий: количеством перенесённого материала с анода на катод, толщиной приращённого слоя, шероховатостью поверхности и др.

Целью настоящей работы является исследование закономерностей формирования поверхностных слоёв на подложках из железа Армко, сталей 45 и 12Х18Н10Т в зависимости от материала легирующего электрода и длительности обработки, установление на их основе зависимостей между параметрами оборудования ЭЭЛ и качеством поверхностей покрытий.

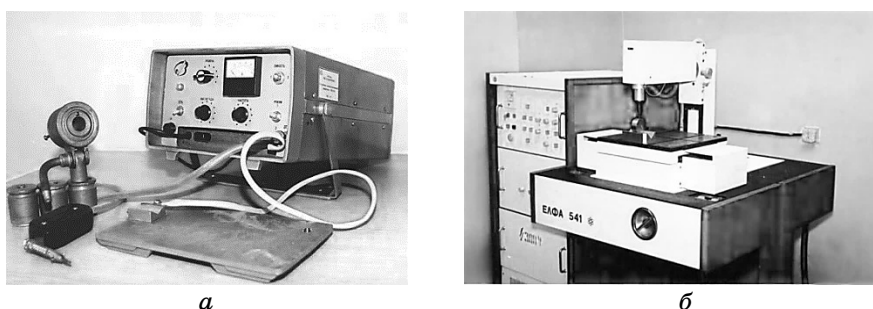
## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Электроэрозионные процессы при ЭЭЛ, как правило, оценивают по величинам эрозии анода на катод (или привесу катода). Привес катода определяет производительность процесса или интенсивность роста слоя покрытия на катоде-детали. На эти процессы существенно влияют параметры разряда, свойства материалов анода и катода, продолжительность легирования и некоторые другие факторы.

Исследование массопереноса и шероховатости покрытий, в зависимости от режима ЭЭЛ и материалов анода и катода, проводилось на установке с ручным вибратором модели «ЭИЛ-8А» (рис. 1, а). Основные режимы её работы приведены в табл. 1. Для ёмкостей накопительного конденсатора  $C = 20$  мкФ и  $C = 300$  мкФ установка имеет по 8 режимов работы.

ЭЭЛ образцов из железа Армко, стали 45 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т осуществлялось твёрдыми износостойкими (хром, вольфрам, титан, никель, твёрдый сплав ВК8 и Т15К6) и мягкими антифрикционными (индий, олово, медь) металлами на протяжении 10 мин с взвешиванием анода и образца через 1 или 2 мин (циклическое легирование) и при непрерывном легировании в течение 2, 4, 6, 8 и 10 мин. Эрозию анода и привес катода определяли на аналитических весах «ВЛА-200» с точностью до  $10^{-4}$  г. Шероховатость поверхности измеряли на приборе профилографе мод. 201 завода «Калибр» путём снятия и обработки профилограмм.

С целью изучения процессов формирования поверхностных слоёв при бесконтактном ЭЭЛ использовали механизированную установ-



**Рис. 1.** Установки ЭЭЛ: «ЭИЛ-8А» с ручным вибратором (а) и механизированная модель «Элфа-541» (б).

**Fig. 1.** EEA devices: 'EIL-8A' with hand vibrator (a) and mechanized 'Elfa-541' model (b).

ку типа «Элфа-541» (рис. 1, б). В связи с тем, что глубина ЭЭЛ слоёв, сформированных на этой установке небольшая (10–15 мкм), для увеличения длины исследуемого участка слоя изготавливали косые шлифы под углом  $25^\circ$ .

При ЭЭЛ образцов из железа Армко, сталей 45 и 12Х18Н10Т в качестве электродов использовали медь М1, вольфрам и твёрдый сплав ВК6М. ЭЭЛ проводили при  $C = 0,47$  мкФ, продолжительности импульса  $T_i = 8$  мкс, рабочем токе  $J_p = 12,8$  А. Коэффициент заполнения равнялся 0,2. Скорость обработки составляла 0,6 мм/с, электрод совершал 2500 оборотов в минуту.

**ТАБЛИЦА 1.** Режимы работы установки «ЭИЛ-8А».

**TABLE 1.** Working regime for device 'EIL-8A'.

Номер режима	$U_{xx}$ , В	$J_{кз}$ , А		Производительность $t$ , см <sup>2</sup> /мин		Мощность разряда $N_p$ , Вт	
		$C = 20$ мкФ	$C = 300$ мкФ	$C = 20$ мкФ	$C = 300$ мкФ	$C = 20$ мкФ	$C = 300$ мкФ
1	38,5	0,2–0,4	1,0–1,4	0,13	0,20	11,5	48,1
2	48,2	0,4–0,5	1,4–1,6	0,14	0,25	21,7	72,3
3	56,1	0,5–0,6	1,6–2,0	0,16	0,30	30,9	101,0
4	62,8	0,6–0,7	1,8–2,0	0,17	0,55	40,8	119,3
5	68,7	0,7–0,8	2,0–2,2	0,20	0,70	51,5	144,3
6	73,6	0,8–0,9	2,2–2,4	0,25	1,0	62,6	169,3
7	78,6	0,9–1,0	2,4–2,6	0,30	1,5	74,7	196,5
8	83,4	1,0–1,2	2,6–2,8	0,33	2,0	91,7	225,2

Исследование поверхностного слоя образцов, упрочнённых на ручной установке «ЭИЛ-8А», проводилось на растровом электронном микроскопе с рентгеновским микроанализатором «РЭММА-200», а образцов, обработанных на механизированной установке «Елфа-541», — на растровых электронных микроскопах «BS-350» и «РЭМ-100». При этом проводился топографический анализ наиболее характерных участков поверхности и качественный рентгеновский микроанализ сформированного покрытия для идентификации основных элементов в нём. Просмотр и съёмку рельефа поверхности осуществляли при разных увеличениях с усилением мелкомасштабной структуры с помощью  $Y$ -модуляции сигнала. Регистрация характеристического рентгеновского излучения основных элементов качественного микроанализа проводилась с помощью кристалл-дифракционных спектрометров по линиям  $K_{\alpha}$ -серии (для элементов Cu, Fe, Ni, Cr) и  $L_{\alpha}$ -серии (для W) с развёртыванием интенсивности излучения этих элементов на экране электронно-лучевой трубки кинескопа и фотосъёмкой при линейном сканировании электронного зонда по поверхности объекта.

Рентгеновский фазовый анализ образцов проводили на установке ДРОН-3М в кобальтовом ( $CoK_{\alpha}$ ) монохроматизированном излучении. В качестве кристалла-монохроматора был применён пиролитический графит, отсекающий  $K_{\beta}$ -излучение кобальта. Режим работы трубки:  $U = 45$  кВ и  $I = 40$  мА. Для получения линий с наименьшей возможной шириной применялся набор щелей 2 мм, 8 мм и 0,25 мм. Для снижения асимметрии использовались щели Соллера с учётом расходимости до  $2^{\circ} 30'$ . Запись линий (интенсивности отражённых лучей) осуществлялась на диаграммную ленту самописца ЛКС-4. Скорость перемещения ленты 1800 мм/ч, скорость вращения счётчика  $1^{\circ}$ /мин, что соответствовало масштабу  $1$  мм =  $1'$ . Угловое положение записанных пиков определялось для узких нерасщеплённых линий по положению максимума, а размытых по положению центра тяжести. В последнем случае применялась автоматизированная съёмка по точкам с шагом сканирования  $\Delta(2\theta) = 0,01$ . Идентификация фаз осуществлялась путём сравнения экспериментально полученных межплоскостных расстояний с табличными или теоретическими расстояниями для тех фаз, которые могут присутствовать в образцах.

Для анализа фазового состояния проведены съёмки дифрактограмм с поверхности покрытий на образцах с подложками из стали 45 и железа Армко на всех углах  $\theta$  от  $20^{\circ}$  до  $150^{\circ}$ . В качестве анода применяли железо Армко, хром, вольфрам, титан, никель. ЭЭЛ проводили в среде воздуха и аргона. Длительность воздействия составляла в основном  $1$  мин/см<sup>2</sup>. Дополнительно исследовались образцы легированные титаном, вольфрамом и никелем в течение  $2$  мин/см<sup>2</sup>.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 3.1. Влияние режима легирования и материала анода на массоперенос

С целью сопоставления влияния различных материалов подложки (железо Армко, стали 45 и 12X18H10T) и легирующего электрода на массоперенос определялся привес катода после циклического легирования (процесс ЭЭЛ прерывался через каждые 2 мин) электродами из хрома, вольфрама, титана, никеля и твёрдого сплава ВК8 при мощности разряда  $N_p = 144,3$  Вт (рис. 2).

Анализируя данные зависимости, можно отметить, что механизм формирования поверхностного слоя при ЭЭЛ хромом, вольфрамом и титаном примерно одинаковый, тогда как при легировании никелем и твёрдым сплавом ВК8 наблюдается совершенно иная картина. Так, уже на первых минутах легирования происходит значительный привес катода, который существенно превышает привес при легировании другими элементами.

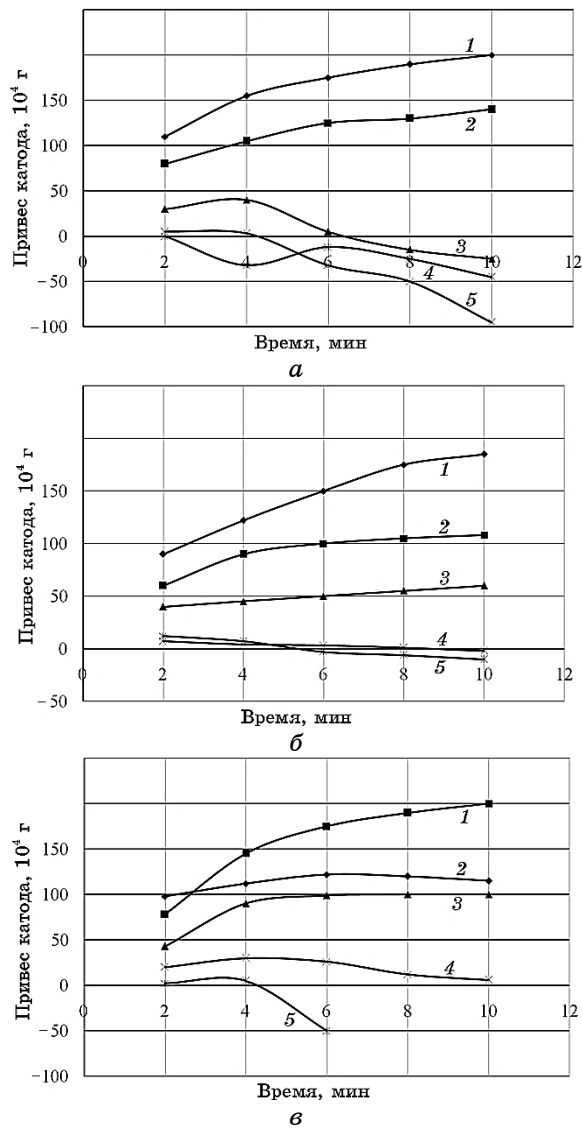
Значительного влияния материала основы на характер массопереноса нами не наблюдалось. Отличие состоит лишь в том, что максимальный привес наблюдается при легировании железа Армко и стали 45 никелем, а стали 12X18H10T — твёрдым сплавом ВК8 (рис. 2). Что касается эрозии анода, то для всех электродов с увеличением параметров режима ЭЭЛ она возрастает, но на одном режиме за равные промежутки времени меняется незначительно.

Влияние материала анода, по-видимому, определяется особенностями взаимодействия с материалом подложки, характером и степенью их взаимодействия с железом. Значительный привес на катоде при легировании никелем, твёрдым сплавом и хромом объясняется высокотемпературными фазовыми превращениями электродных материалов с образованием неограниченных твёрдых растворов легирующих элементов в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железе из-за соответствия параметров кристаллических решёток и близких размеров атомов. Существенное влияние на формирование слоя оказывает характер взаимодействия подложки и наносимого материала, поскольку адгезия поверхностного слоя и прочность сцепления определяются способностью элементов легирования растворяться в легируемом материале [15].

Так, никель неограниченно растворяется в  $\gamma$ -железе. Поскольку процесс ЭЭЛ происходит при повышенных температурах, в условиях образования аустенита, создаются условия для образования твёрдых растворов никеля и железа. Следствием этого является значительный привес на катоде (рис. 2). Хром с  $\alpha$ -железом образует неограниченный твёрдый раствор, и с увеличением мощности разряда при ЭЭЛ происходит интенсивный перенос анода на поверх-

ность катода до времени обработки 4–6 мин.

При ЭЭЛ твёрдым сплавом ВК8 наблюдается уменьшение массопереноса (рис. 2, *а*). На этот процесс оказывают влияние компоненты твёрдого сплава, ограниченно растворимые в  $\alpha$ - и  $\gamma$ -железе. ЭЭЛ



**Рис. 2.** Массоперенос при циклическом легировании железа Армко (*а*), сталей 45 (*б*) и 12Х18Н10Т (*в*) Ni (1), ВК8 (2), Cr (3), Ti (4) и W (5).

**Fig. 2.** Mass transfer at a cyclic alloying of Armco (*a*), steel 45 (*b*), and steel 12Kh18N10T (*c*) with Ni (1), VK8 (2), Cr (3), Ti (4), and W (5).



стали 12X18H10T сплавом ВК8 отличается максимальными значениями суммарного привеса катода по сравнению с этим показателем для Армко железа и стали 45 [16].

Вольфрам и титан ограниченно растворяются в сплавах железа. Кроме того, по характеру зависимостей привеса катода можно установить достаточно чёткую связь между суммарным привесом катода и положением легирующего элемента в периодической системе химических элементов. Так, титан принадлежит к переходным металлам IV группы 4-го периода, вольфрам — к VI группе 6-го периода. В частности, прослеживается тенденция привеса катода с увеличением атомных масс металлов (рис. 2). Кроме того, привес на катоде определяется плотностью наносимого вещества. Это, по-видимому, связано с тем, что количество эродированного материала анода определяется энергией атомизации металла, определяемой совокупностью физико-термических характеристик, таких как температура плавления и температура хрупкого разрушения анода, атомная теплоёмкость и скрытая теплота плавления [17].

При «мягких» режимах и непродолжительном времени обработки в процессе легирования вольфрамом перенос вещества с анода на катод происходит до определённого момента. С увеличением мощности разряда процесс разрушения покрытия превалирует над процессом его формирования, в результате чего и наблюдается отрицательный привес на катоде.

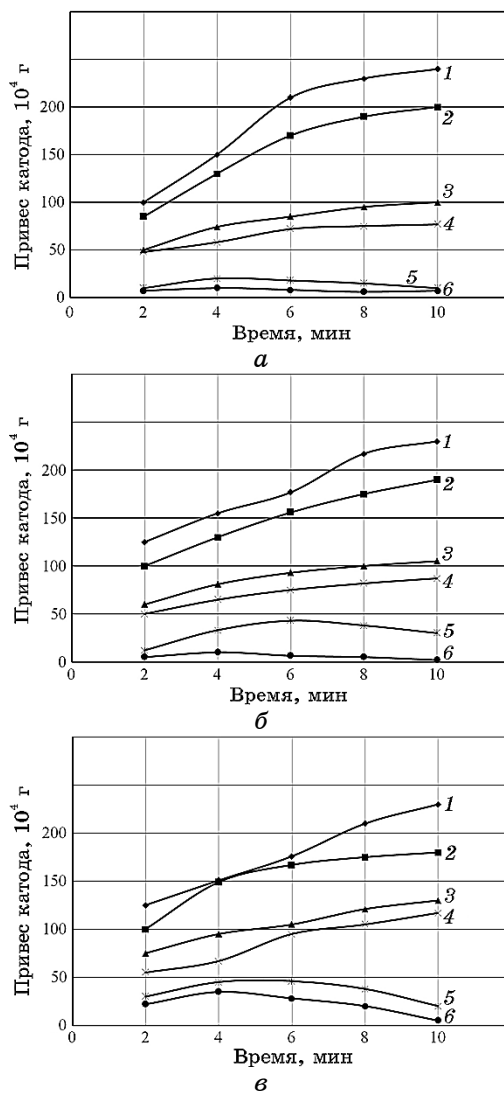
Характер массопереноса в случае непрерывного ЭЭЛ (процесс ЭЭЛ протекает непрерывно в течение 2, 4, 6, 8 и 10 мин) оказывается иным (рис. 3). В таких условиях интенсивность массопереноса выше, чем при циклическом легировании.

По-видимому, отличие в массопереносе при непрерывном и циклическом легировании можно объяснить следующим образом. В случае прерывистого легирования на каждом цикле происходит нагревание и остывание поверхности покрытия. При этом возникают избыточные напряжения, величина которых превышает предел прочности покрытия, что приводит к разрушению поверхностного слоя. Вследствие многократного влияния электрических импульсов и механических нагрузок количество разрушенного и удалённого материала со сформированного слоя начинает превышать количество перенесённого и привес замедляется [1].

Для разработки технологии упрочнения, наряду с исследованием интенсивности переноса материала с анода на катод, не менее важным является изучение изменения параметра шероховатости поверхности в зависимости от режимов ЭЭЛ. В таблице 2 приведены значения шероховатости поверхности и количество перенесённого в течение 2 мин вещества с анода на катод в зависимости от режима ЭЭЛ. С увеличением мощности разряда ЭЭЛ увеличивается привес катода и шероховатость поверхности.

### 3.2. Топография и распределения химических элементов в поверхностных слоях при (бес)контактном ЭЭЛ

Топография и качественный химический состав поверхностного слоя, сформированного при помощи установки с ручным вибрато-



**Рис. 3.** Массоперенос при непрерывном ЭЭЛ железа Армко (а), стали 45 (б) и стали 12Х18Н10Т (в) Ni (1), ВК8 (2), Cr (3), Мо (4), W (5), и Ti (6).

**Fig. 3.** Mass transfer at continuous EEA of Armco iron (a), steel 45 (б) and steel 12X18H10T (в) with Ni (1), VK8 (2), Cr (3), Mo (4), W (5), and Ti (6).

**ТАБЛИЦА 2.** Шероховатость поверхности и привес катода при ЭЭЛ твёрдыми износостойкими металлами.**TABLE 2.** Surface roughness and weight increment of cathode at an EEA with solid wear-resistant metals.

Материал основы	Материал электрода	С, мкФ	Шероховатость, $R_a$ , мкм				
			Режим ЭЭЛ				
			1	3	5	7	
Железо Армко	Хром	20	0/1,7 <sup>†</sup>	4,0/2,0	10,0/2,6	16,0/2,9	
		300	12,0/2,9	17,0/3,5	22,0/4,8	37,0/6,5	
	Вольфрам	20	3,0/1,6	12,0/2,7	17,0/3,2	22,0/4,0	
		300	9,0/3,9	18,0/5,6	27,0/7,9	15,0/7,9	
		ВК8	20	6,0/1,6	10,0/2,4	15,0/2,8	20,0/3,2
			300	9,0/3,9	18,0/5,6	27,0/7,9	15,0/10,9
Сталь 45	Хром	20	0/1,5	5,0/1,9	12,0/2,4	19,0/2,8	
		300	15,0/2,8	19,0/3,4	25,0/4,6	41,0/6,2	
	Вольфрам	20	3,0/1,5	13,0/2,6	19,0/3,0	24,0/3,8	
		300	11,0/3,8	20,0/5,4	30,0/7,8	18,0/10,5	
		ВК8	20	7,0/1,5	12,0/2,2	17,0/2,6	25,0/3,0
			300	22,0/2,8	30,0/3,5	50,0/4,8	60,0/6,5
	12X18H10T	Хром	20	0/1,5	7,0/1,7	15,0/2,1	25,0/2,5
			300	17,0/2,5	23,0/3,1	29,0/4,2	45,0/2,5
Вольфрам		20	5,0/1,5	15,0/2,5	21,0/2,2	25,0/3,5	
		300	9,0/3,5	22,0/5,1	32,0/7,5	20,0/9,3	
		ВК8	20	9,0/1,5	15,0/2,0	25,0/2,3	29,0/2,8
			300	25,0/2,7	35,0/3,2	58,0/4,5	70,0/6,0

<sup>†</sup>В числителе — привес ( $10^4$  г/см<sup>2</sup>), а в знаменателе — шероховатость (мкм).

ром модели «УИЛВ-8», исследовались на образцах из стали 45 и 12X18H10T. Перед ЭЭЛ поверхность образцов шлифовалась. В качестве электродов использовалась чистая медь и вольфрам. ЭЭЛ проводилось при  $N_p = 144,3$  Вт.

Фрактограммы поверхности образцов до и после ЭЭЛ представлены на рис. 4–6.

Текстура поверхности образца подложки после шлифования (рис. 4) состоит из параллельных бороздок глубиной от 1–2 до десятых долей микрометра, вытянутых в направлении шлифовки. При большем увеличении ( $\times 1000$  на рис. 4, б) видны следы частичного смятия гребешков бороздок, а также внедрение абразивных частиц в основу металла стали 12X18H10T.

Поверхность легированного металлического слоя представляет

собой наслоение деформированных при соударении с подложкой капель жидкого электродного металла с язычками растекания и разбрызгивания, с кратерами и гребнями, а также микроучастками растёкшегося жидкого металла, имеющими гладкую закристаллизовавшуюся поверхность. Просматривается волнообразное строение рельефа поверхности, связанное с шаговым перемещением электрода.

При легировании поверхности медным электродом наблюдается более мелкая текстура рельефа слоя (рис. 5 и 6, *г, д, е*) с более развитой поверхностью по сравнению с вольфрамовым электродом (рис. 5 и 6, *а, б, в*), что вызвано мелкокапельным массопереносом меди и большим перегревом капель жидкого металла, о чём свидетельствует повышенная микропористость слоя (рис. 5, *е* и 6, *е*). Капля меди, имея более низкую температуру плавления, больше растекается по легируемой поверхности, что и является причиной меньшей шероховатости поверхности.

Отмечается также взаимосвязь между материалом подложки и текстурой формируемого покрытия. Так, рельеф поверхности стали 45 состоит из большего количества мелкой текстуры (рис. 5) по сравнению со сталью 12Х18Н10Т (рис. 6). Это можно объяснить различными теплофизическими свойствами сталей, а значит и скоростью отвода тепла от подложки (т.е. скорость охлаждения жидкого металла на подложке из стали 45 выше, чем для стали 12Х18Н10Т). Следовательно, при ЭЛ одноименными металлами большая шероховатость будет в покрытиях, сформированных на подложках с большей теплопроводностью (в данном случае на стали 45).

Таким образом, проведённый топографический анализ показал,

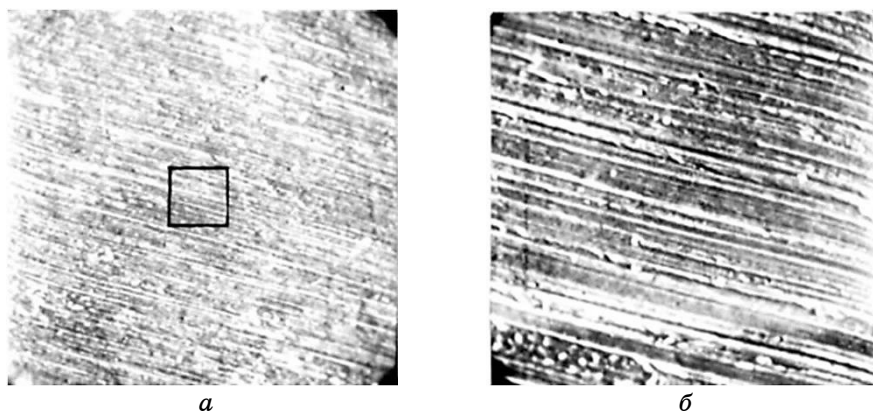
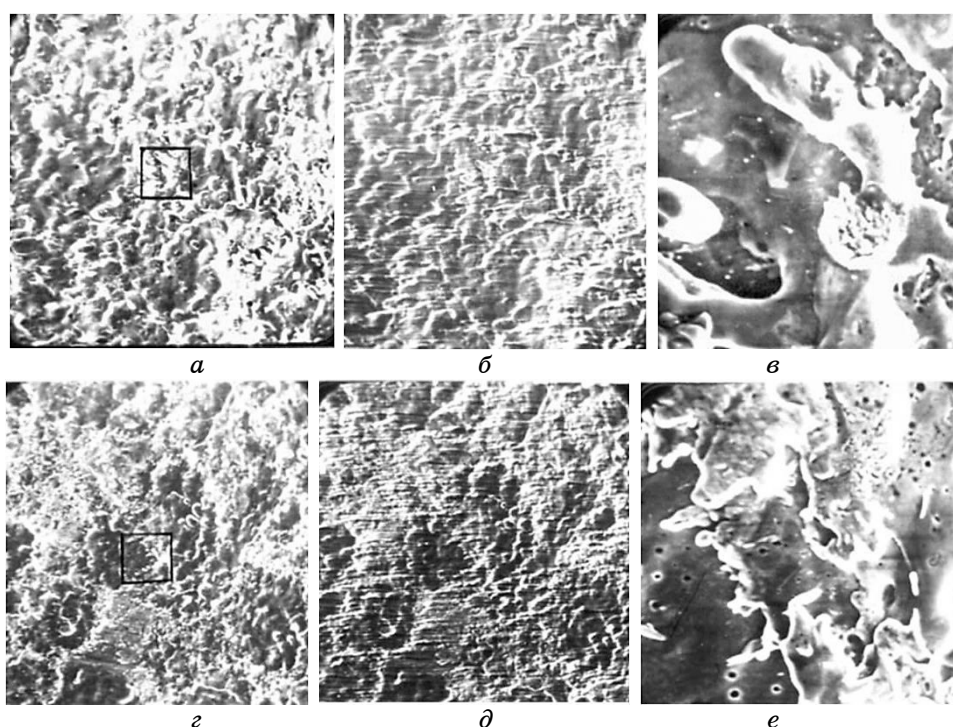


Рис. 4. Текстура участка поверхности стали 12Х18Н10Т:  $\times 100$  (*а*),  $\times 1000$  (*б*).

Fig. 4. Surface texture of the 12Kh18N10T steel area:  $\times 100$  (*a*),  $\times 1000$  (*b*).

что рельеф поверхности зависит от материала анода и подложки. Меньшая текстура и шероховатость наблюдается при ЭЭЛ анодом с меньшей температурой плавления (медный электрод), а на подложках с более высоким коэффициентом теплопроводности (сталь 45), несмотря на меньшую текстуру, шероховатость выше.

Как видно из представленных записей интенсивности характеристического рентгеновского излучения (рис. 7), в составе покрытия наряду с основным элементом материала, применяемого для легирования, присутствуют основные элементы металла подложки, что свидетельствует о формировании слоя из перемешанного оплавленного металла поверхности образца и капель расплавленного легирующего электрода. На всей протяжённости линии сканирования  $\approx 350$  мкм по поверхности слоя фиксируются основные элементы легирующего электрода и подложки, и только в местах отсутствия



**Рис. 5.** Текстура участка поверхности стали 45, легированной вольфрамом (*a* —  $\times 100$ ; *б* —  $\times 100$ , Y-модуляция; *в* —  $\times 1000$ ) и медью (*г* —  $\times 100$ ; *д* —  $\times 100$ , Y-модуляция; *е* —  $\times 1000$ ).

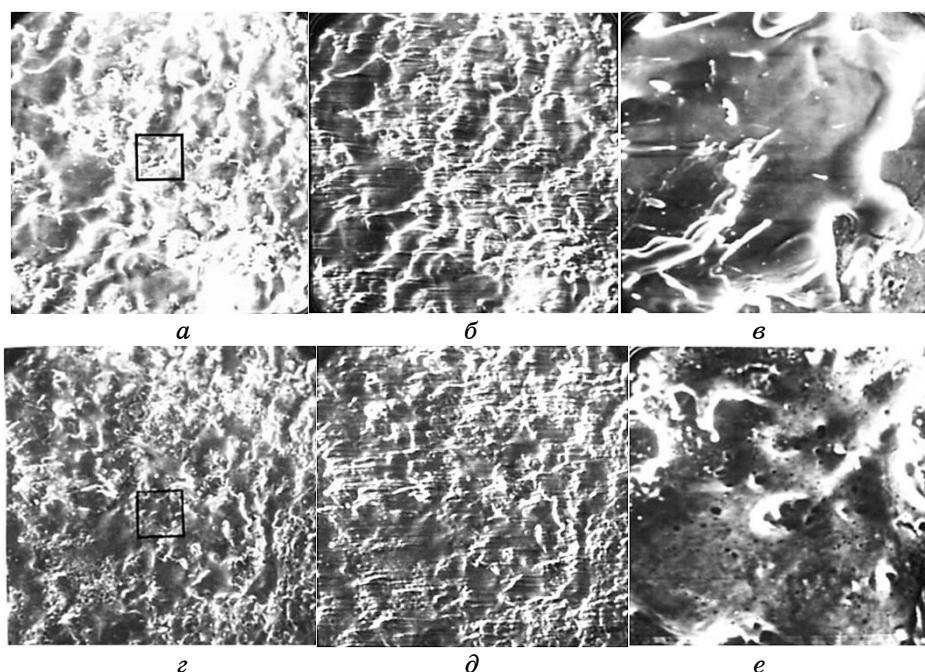
**Fig. 5.** Surface texture of the 45 steel area alloyed with tungsten (*a*— $\times 100$ ; *б*— $\times 100$ , Y-modulation; *в*— $\times 1000$ ) and copper (*г*— $\times 100$ ; *д*— $\times 100$ , Y-modulation; *е*— $\times 1000$ ).

слоя резко падает интенсивность излучения основного элемента электрода с увеличением интенсивности основных элементов подложки (рис. 7, *з*).

Как видно из фрактограмм поверхностей образцов, легированных на механизированной установке ЭЭЛ «Элфе-541», медью, вольфрамом и твёрдым сплавом ВК6М (рис. 8 и 9), их рельеф имеет волнообразное строение, образованное скоплением гребней и впадин различных размеров закристаллизовавшегося металла. Сплошность покрытий на всех образцах составляла  $\cong 100\%$ .

Для ЭЭЛ медным электродом характерна малая разновысотность гребней и впадин (колеблется от долей до нескольких микрометров). Разновысотность при использовании электродов из вольфрама и твёрдого сплава ВК6М достигает 10 мкм.

В плоскостной размерности гребней и впадин отличается следующее. Основа железо Армко: размерность гребней и впадин минимальна при применении медного электрода, но максимальна для

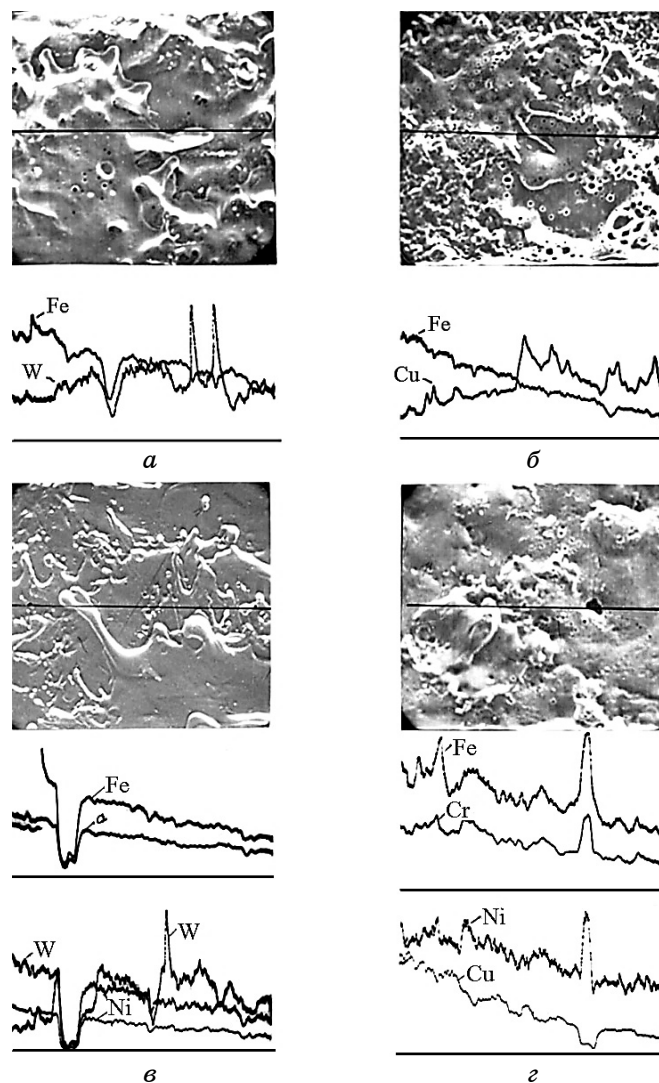


**Рис. 6.** Текстура участка поверхности стали 12X18N10T, легированной вольфрамом (*a* —  $\times 100$ ; *б* —  $\times 100$ , Y-модуляция; *в* —  $\times 1000$ ) и медью (*з* —  $\times 100$ ; *д* —  $\times 100$ , Y-модуляция; *е* —  $\times 1000$ ).

**Fig. 6.** Surface texture of the 12Kh18N10T steel area alloyed with tungsten (*a*— $\times 100$ ; *б*— $\times 100$ , Y-modulation; *в*— $\times 1000$ ) and copper (*з*— $\times 100$ ; *д*— $\times 100$ , Y-modulation; *е*— $\times 1000$ ).

вольфрама и твёрдого сплава ВК6М.

Основа сталь 45: размерность гребней и впадин одинакова для медного и вольфрамового электродов, а также с повышенной долей мелкой размерности у твёрдого сплава ВК6М. Основа сталь 12X18H10T: размерность гребней и впадин одинаковая для всех пе-



**Рис. 7.** Содержание основных элементов в поверхностном слое сталей 45 и 12X18H10T после ЭЭЛ соответственно вольфрамом (а, в) и медью (б, з);  $\times 325$ .

**Fig. 7.** Content of the base elements in 45 and 12Kh18N10T steels' surface layers after EEA with tungsten (a, в) and copper (б, з), respectively;  $\times 325$ .

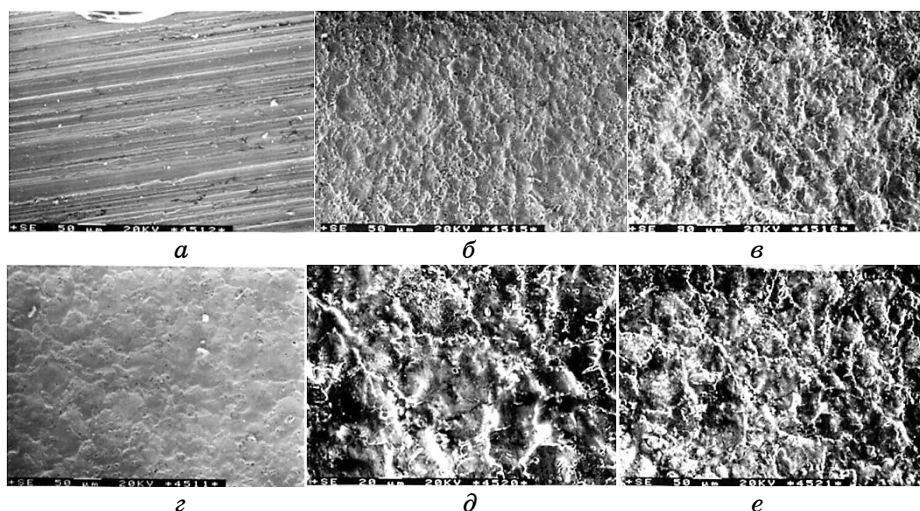
речисленных электродов.

Из рентгеноспектрального анализа поверхностного слоя железа Армко, легированного медью, вольфрамом и твёрдым сплавом ВК6М, следует, что в слое, кроме материала легирующего электрода, содержится соответственно до 5%, 25% и 30% железа, а толщина слоя соответственно равна  $\cong 7,8$ ,  $\cong 6,2$  и  $\cong 9,3$  мкм.

Диффузионная зона при легировании медью и вольфрамом практически отсутствует, а при легировании твёрдым сплавом ВК6М составляет  $\cong 1,5$ – $2,0$  мкм.

При легировании медью, вольфрамом и твёрдым сплавом ВК6М стали 45 в слое, кроме материала легирующего электрода, содержится соответственно до 5–6%, 25–30% и 35% железа; толщина слоя равна соответственно  $\cong 9,5$ ,  $\cong 7,2$  и  $\cong 9,0$  мкм; а ширина диффузионной зоны составляет соответственно  $\cong 1,0$ ,  $\cong 1,0$  и  $\cong 2$ – $3$  мкм.

При легировании стали 12X18H10T вольфрамом и твёрдым сплавом ВК6М в состав поверхностного слоя, кроме вольфрама и кобальта, входят никель, хром и железо в количествах соответственно (в вес. %): для вольфрамового электрода — до 5% Ni, 8% Cr и 30% Fe, остальное — вольфрам; для электрода из твёрдого сплава ВК6М — 3–4% Ni, 6–7% Cr и 25–28% Fe. Толщина слоя и диффузионной зоны соответственно равны  $\cong 20,5$ ,  $\cong 5$ – $6$  мкм и  $\cong 8,6$ ,  $\cong 2$



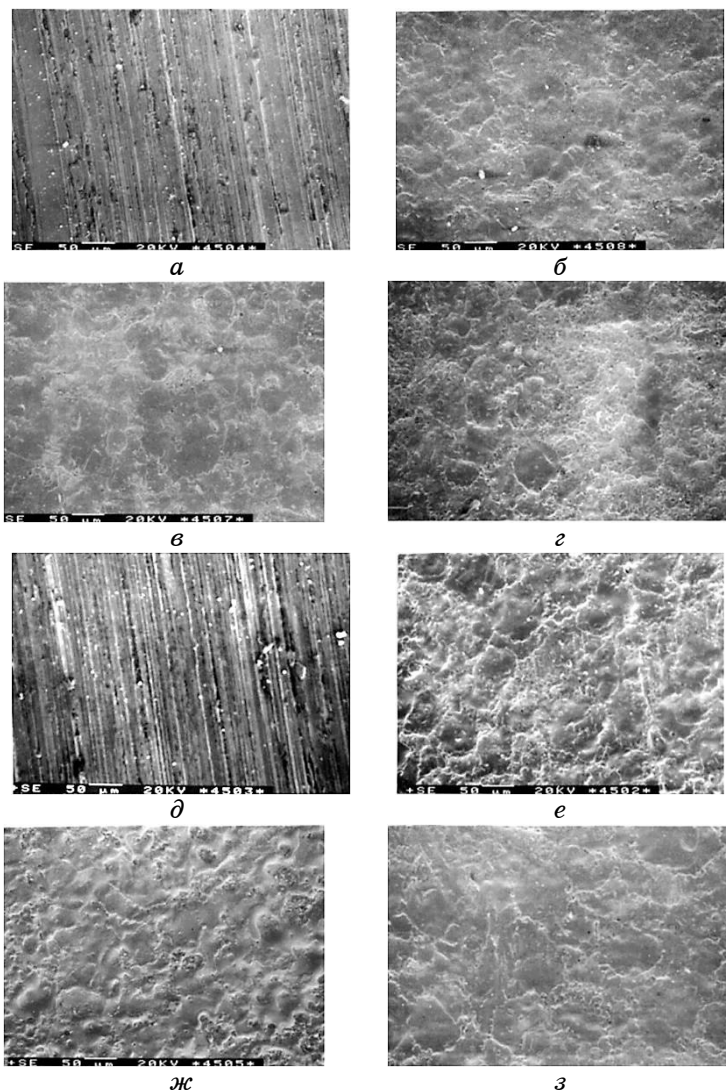
**Рис. 8.** Топография образцов из железа Армко до (*a* —  $\times 130$ ) и после ЭЭЛ медью (*b* —  $\times 130$ , *в* —  $\times 200$ ), вольфрамом (*г* —  $\times 130$ ) и твёрдым сплавом ВК6М (*д* —  $\times 250$ , *е* —  $\times 130$ ) на установке «Элфа-541» (см. рис. 1).

**Fig. 8.** Topography of Armco iron samples before (*a*— $\times 130$ ) and after the EEA with copper (*b*— $\times 130$ , *в*— $\times 200$ ), tungsten (*г*— $\times 130$ ), and hard alloy VK6M (*д*— $\times 250$ , *е*— $\times 130$ ) on ‘Elfa-541’ device (see Fig. 1).



мкм (табл. 3).

Высокая адгезионная связь сформированных электроэрозионных покрытий с основой объясняется не только интенсивным пере-



**Рис. 9.** Топография образцов из сталей 45 и 12X18H10T ( $\times 130$ ) до (*а, д*) и после ЭЭЛ медью (*б, е*), вольфрамом (*в, ж*) и твёрдым сплавом ВК6М (*г, з*) соответственно на установке «Элфа-541» (рис. 1).

**Fig. 9.** Topography of 45 and 12X18H10T steels' samples ( $\times 130$ ) before (*a, d*) and after EEA with copper (*b, e*), tungsten (*v, zh*) and VK6M hard alloy (*g, z*), respectively, using 'Elfa-541' device (Fig. 1).

мешиванием материалов электродов в жидкой фазе, но и диффузией материала анода в катод в твёрдой фазе. Подтверждением этого является наличие зоны перехода от «белого» слоя к основе даже при ЭЭЛ бесконтактным способом (табл. 3).

### 3.3. Фазовый состав поверхностного ЭЭЛ слоя

Результаты исследований фазового состояния поверхностного ЭЭЛ слоя образцов из железа Армко и стали 45 после ЭЭЛ железом Армко, хромом, вольфрамом, титаном и никелем приведены в табл. 4.

На основании результатов рентгеноструктурного анализа поверхности после ЭЭЛ можно заключить, что защитная среда аргона обеспечивает защиту поверхности от окисляющего воздействия кислорода воздуха и образования окислов элементов в поверхностном слое, хотя содержание этих окислов весьма незначительно. Чисто металл может переноситься на катод лишь при длительном и непрерывном воздействии разряда.

Анализ данных таблицы 4 показывает, что легирование железа Армко электродом из того же материала позволяет получить слой с повышенной твёрдостью. Это происходит в результате существенного влияния высокоскоростного нагрева слоя и охлаждения последнего с образованием метастабильных фаз.

**ТАБЛИЦА 3.** Ориентировочные данные размеров ЭЭЛ-слоя и процентного содержания основных элементов в нём.

**TABLE 3.** Approximate data of EEA-layer size and percent content of basic elements in it.

Материал		Толщина, мкм		Содержание основных элементов, вес. %				
основы	электрода	слоя	диффузионной зоны	Fe	Ni	Cr	Cu	W
Армко-железо	Медь	7,8	—	5	—	—	ост.	—
	Вольфрам	6,2	—	25	—	—	—	ост.
	ВК6М	9,3	1,5–2,0	30	—	—	—	ост.
Сталь 45	Медь	9,5	1,0	5–6	—	—	ост.	—
	Вольфрам	7,2	1,0	25–30	—	—	—	ост.
	ВК6М	9,0	2,0–3,0	35	—	—	—	ост.
Сталь 12X18Н10Т	Медь (а) <sup>‡</sup>	11,6	<1,0	14,5	2–2,5	4	ост.	—
	Медь (б) <sup>‡</sup>	18,5	2,0–3,0	4	1	1,5	ост.	—
12X18Н10Т	Вольфрам	20,5	5,0–6,0	30	5	8	—	ост.
	ВК6М	8,6	2,0	25–28	3–4	6–7	—	ост.

<sup>‡</sup>а и б — различные линии сканирования.

Если воздушная среда влияет на фазовый состав и свойства слоя, то нейтральная среда защищает поверхностный слой от влияния элементов среды — воздуха (углерод, азот, кислород). Однако физико-химические свойства слоя формируются вследствие высокоскоростного процесса нагрева и охлаждения при электроэрозион-

ТАБЛИЦА 4. Результаты рентгеноструктурного анализа.

TABLE 4. X-ray analysis results.

Материал основы	Материал электрода	Среда; время ЭЭЛ	Характеристика слоя и его фазового состава
Железо Армко	Железо Армко	Аргон; 1 мин	Фазовый состав — $\alpha$ -Fe, других фаз не наблюдается. Решётка более напряжённая, чем в подложке. Судя по твёрдости $H_{\mu} \cong \cong 5500$ МПа, происходят высокоскоростные фазовые превращения с получением решётки типа малоуглеродистого мартенсита
		Воздух; 1 мин	Среда влияет на фазовый состав. Кроме преобладающей $\alpha$ -фазы наблюдается наличие 10–15% аустенита и не менее 5% окисла FeO
Железо Армко	Железо Армко	Аргон; 1 мин	$\alpha$ , мартенситного типа, есть следы $\gamma$ -фазы 10%
		Воздух; 1 мин	Увеличивается количество аустенита до 20%, присутствует в значительном количестве FeO
Хром	Хром	Воздух; 1 мин	$\alpha$ , небольшое количество $\gamma$
		Воздух; 2 мин	$\alpha$ , довольно в большом количестве присутствует $\beta$ -хром, до 30%, аустенита до 15%
Сталь 45	Вольфрам	Аргон; 1 мин	$\alpha$ , следы вольфрама, большое количество интерметаллида $Fe_2W$ , примерно 5%
		Воздух; 1 мин	$\alpha$ , несколько больше W и $Fe_2W$ , появляется $\gamma$
		Воздух; 2 мин	$\alpha$ , следы W и $Fe_2W$ , значительно больше аустенита
Титан	Титан	Аргон; 1 мин	$\alpha$ , следы $\gamma$ и $TiO_2$
		Воздух; 1 мин	$\alpha$ — основа, несколько больше $\gamma$ и достаточно большое количество окисла $TiO_2$
		Воздух; 2 мин	$\alpha$ , $\gamma$ , окислы $TiO_2$ , $TiO_3$ , $TiO$ , проявляется $\alpha$ -Ti
Никель	Никель	Аргон; 1 мин	$\alpha$ и $\gamma$ (до 30%)
		Воздух; 1 мин	$\gamma$ + Ni, небольшое количество $\alpha$
		Воздух; 2 мин	Основа Ni, есть NiO, появляется $\alpha$

ном разряде. При замене нейтральной среды обработки (аргона) на воздух в структуре появляется аустенитная составляющая, что свидетельствует о доставке из среды атомов углерода. Однако никаких признаков присутствия соединений с азотом, как в среде аргона, так и без него не обнаружено.

С увеличением содержания углерода в материале катода (материал основы сталь 45) в большей степени проявляется влияние процессов сверхскоростного нагрева и охлаждения.

При легировании хромом в среде воздуха образуется в основном  $\alpha$ -фаза (мартенсит) с небольшим количеством аустенита. Однако увеличение длительности электроэрозионного разряда от 1 мин/см<sup>2</sup> до 2 мин/см<sup>2</sup> приводит к появлению в структуре чистого хрома в довольно большом количестве, что свидетельствует о массопереносе элемента анода на катод. То же можно отметить и при легировании вольфрамом. Рентгеноструктурный анализ позволяет установить, что среда на образование соединений азота также не оказывает влияния. В данном случае при ЭЭЛ в среде аргона в основном образуется мартенситная фаза, появляются следы переноса материала анода в виде чистого вольфрама и интерметаллидных соединений типа Fe<sub>2</sub>W.

После ЭЭЛ на воздухе фазовый состав слоя не изменяется, однако фиксируется большее количество чистого W и Fe<sub>2</sub>W. Причём, увеличение длительности эрозионного разряда существенных изменений в структуру и фазовый состав не вносит.

Подобным образом среда влияет и при легировании титаном. Однако в этом случае с увеличением продолжительности легирования в значительной степени появляется в чистом виде  $\alpha$ -Ti и его окислы.

При ЭЭЛ никелем наблюдается отложение никеля и образование  $\gamma$ -фазы. Причём, с увеличением длительности разряда в большей степени происходят процессы отложения элемента анода на катоде.

Таким образом, во всех случаях, кроме легирования никелем, основу структуры слоя составляет мартенситная фаза. Другие структурные составляющие присутствуют в незначительном количестве, в отдельных случаях не более 20–30% в сумме. Поэтому свойства слоя определяются свойствами мартенситной фазы, поскольку мартенсит при ЭЭЛ разными материалами легирован в различной степени.

#### 4. ВЫВОДЫ

Обобщая результаты проведённых исследований, можно сделать следующие выводы.

1. По степени увеличения массопереноса материалы электродов располагаются в ряд: катод — железо Армко, сталь 45, нержавеющей

щая сталь 12X18H10T; анод — титан, вольфрам, хром, ВК8, никель.

2. С увеличением продолжительности легирования, существует ограничение по количеству перенесённого материала с анода на катод, причём, чем больше мощность разряда, тем быстрее наступает максимум по привесу катода.

3. При ЭЭЛ предпочтение следует отдавать непрерывному легированию, обеспечивающему, по сравнению с циклическим, приблизительно в два раза больший привес на катоде.

4. Микрорентгеноспектральным анализом определено, что как при контактном, так и бесконтактном ЭЭЛ поверхностный легированный слой состоит из элементов анода и катода. При этом наличие диффузионного слоя отмечается при обоих случаях легирования.

5. Исследование поверхности показывает, что меньшая шероховатость отмечается на подложках с более низким коэффициентом теплопроводности и при ЭЭЛ электродами с более низкой температурой плавления.

6. В результате исследований фазового состояния поверхности образцов во всех случаях, кроме легирования никелем, основу структуры слоя составляет мартенситная фаза, другие структурные составляющие присутствуют в незначительном количестве (не более 20–30% в сумме), поэтому свойства слоя определяются свойствами мартенситной фазы. Так как мартенсит при ЭЭЛ разными материалами легирован в различной степени, то и свойства слоя зависят не только от свойств  $\alpha$ -фазы, но и от уровня её легирования.

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. В. Б. Тарельник, *Управление качеством поверхностных слоёв деталей комбинированным электроэрозионным легированием* (Сумы: МакДен: 2002).
2. В. С. Марцинковский, *Вісник СумДУ. Серія Технічні науки*, № 2: 57 (2007).
3. Д. Н. Коротаев, *Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием* (Омск: СибАДИ: 2009).
4. А. Д. Верхотуров, И. М. Муха, *Технология электроискрового легирования металлических поверхностей* (Киев: Техника: 1982).
5. В. Ф. Коробейник, С. И. Рудюк, С. В. Коробейник, *Электронная обработка материалов*, № 1: 15 (1989).
6. В. М. Ревуцкий, А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, *Электронная обработка материалов*, № 6: 32 (1981).
7. В. В. Михайлов, К. А. Бачу, Е. А. Пасинковский, П. В. Перетятку, *Электронная обработка материалов*, 42, № 3: 106 (2006).
8. А. Д. Верхотуров, И. А. Подчерняева, Л. Ф. Прядко, Ф. Ф. Егоров, *Электродные материалы для электроискрового легирования* (Москва: Наука: 1988).

9. С. А. Лузан, О. М. Горбачевская, *Вестник НТУ «ХПИ». Автомобиле- и тракторостроение*, № 60 (966): 53 (2012).
10. А. П. Уманский, М. С. Стороженко, В. В. Акоюян, И. С. Марценюк, *Авиационная космическая техника и технология*, № 9 (96): 214 (2012).
11. А. Е. Кудряшов, О. Н. Доронин, Е. И. Замулаева, Е. А. Левашов, Н. В. Швындина, *Чёрные металлы*, № 10 (982): 61 (2013).
12. L. Chen, L. Wang, Zh. Zeng, and T. Xu, *Surface and Coatings Technology*, **201**, Issues 3–4: 599 (2006).
13. И. А. Подчерняева, В. М. Панашенко, А. И. Духота, А. Д. Панасюк, А. Д. Костенко, *Проблемы трибологии*, № 4: 96 (2012).
14. А. Д. Верхотуров, И. А. Подчерняева, Л. А. Коневцов, *Электронная обработка материалов*, **43**, № 6: 10 (2007).
15. А. Д. Верхотуров, *Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании* (Владивосток: Дальнаука: 1995).
16. В. П. Лунева, А. Д. Верхотуров, А. В. Козырь, Т. В. Глабец, В. Н. Бруй, *Электронная обработка материалов*, **41**, № 4: 11 (2005).
17. А. Д. Верхотуров, В. П. Лунева, Т. В. Глабец, А. В. Козырь, С. А. Демин, В. Н. Бруй, *Электронная обработка материалов*, **41**, № 1: 23 (2005).

## REFERENCES

1. V. B. Tarel'nik, *Upravleniye Kachestvom Poverkhnostnykh Sloev Detaley Kombinirovannym Elektroerozionnym Legirovaniem* [Governing by the Quality of Surface Layers via Combining Electroerosive Alloying] (Sumy: MakDen: 2002) (in Russian).
2. V. S. Martsinkovskiy, *Visnyk SumDU. Seriya Tekhnichni Nauky*, No. 2: 57 (2007) (in Russian).
3. D. N. Korotaev, *Tekhnologicheskiye Vozможности Formirovaniya Iznosostoykikh Nanostruktur Elektroiskrovym Legirovaniem* [Possibilities of Forming Wear-Resistant Nanostructures by Electrospark Alloying] (Omsk: SibADI: 2009) (in Russian).
4. A. D. Verkhoturov and I. M. Mukha, *Tekhnologiya Elektroiskrovogo Legirovaniya Metallicheskih Poverkhnostey* [Technology of Electrospark Alloying of Metallic Surfaces] (Kiev: Tekhnika: 1982) (in Russian).
5. V. F. Korobeynik, S. I. Rudyuk, and S. V. Korobeynik, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 1: 15 (1989) (in Russian).
6. V. M. Revutskiy, A. Ye. Gitlevich, and V. V. Mikhaylov, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 6: 32 (1981) (in Russian).
7. V. V. Mikhaylov, K. A. Bachu, Ye. A. Pasinkovskiy, and P. V. Peretyatku, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **42**, No. 3: 106 (2006) (in Russian).
8. A. D. Verkhoturov, I. A. Podchernyayeva, L. F. Pryadko, and F. F. Yegorov, *Elektrodnye Materialy dlya Elektroiskrovogo Legirovaniya* [Electrode Materials for Electrospark Alloying] (Moscow: Nauka: 1988) (in Russian).
9. S. A. Luzan, and O. M. Gorbachevskaya, *Vestnik NTU 'KPI'. Avtomobile- i Traktorostroyeniye*, No. 60 (966): 53 (2012) (in Russian).
10. A. P. Umanskiy, M. S. Storozhenko, V. V. Akopyan, and I. S. Martsenyuk, *Aviatsionnaya Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 9 (96): 214 (2012) (in Russian).

11. A. Ye. Kudryashov, O. N. Doronin, Ye. I. Zamulayeva, Ye. A. Levashov, and N. V. Shvyndina, *Chernye Metally*, No. 10 (982): 61 (2013) (in Russian).
12. L. Chen, L. Wang, Zh. Zeng, and T. Xu, *Surface and Coatings Technology*, **201**, Issues 3–4: 599 (2006).
13. V. M. Panashenko, A. I. Dukhota, A. D. Panasyuk, and A. D. Kostenko, *Problemy Tribologii*, No. 4: 96 2012 (in Russian).
14. A. D. Verkhoturov, I. A. Podchernyaeva, and L. A. Konevtsov, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **43**, No. 6: 10 (2007) (in Russian).
15. A. D. Verkhoturov, *Formirovanie Poverkhnostnogo Sloya Metallov pri Elektroiskrovom Legirovanii* [Formation of Surface Metal Layer with Electrospark Alloying] (Vladivostok: Dalnauka: 1995) (in Russian).
16. V. P. Luneva, A. D. Verkhoturov, A. V. Kozyr', T. V. Glabets, and V. N. Bruy, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **41**, No. 4: 11 (2005) (in Russian).
17. A. D. Verkhoturov, V. P. Luneva, T. V. Glabets, A. V. Kozyr', S. A. Demin, and V. N. Bruy, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, **41**, No. 1: (2005) (in Russian).