

**РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ
ПРИ КОНТАКТНОМ И БЕЗКОНТАКТНОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОМ ЛЕГИРОВАНИИ**

М. Ю. Думанчук, ст. преподаватель,
И. Е. Волошин, аспирант,
Сумский национальный аграрный университет

Представлены результаты исследований влияния режимов и материалов легирующих электродов на качественное и количественное состояние поверхностных слоев на подложках из углеродистой и высоколегированной хромо-никелевой стали. Сформулированы рекомендации, которые позволят назначать режимы электроэрозионного легирования, обеспечивающие получение заданных параметров поверхностного слоя.

Ключевые слова: качество поверхности, поверхностный слой, рентгеноструктурный анализ, толщина слоя, электроэрозионное легирование.

Постановка проблемы в общем виде.

Метод ЭЭЛ, относится к электрофизическим способам обработки материалов, основанных на использовании концентрированных потоков энергии и может быть довольно перспективным для упрочнения и нанесения защитных покрытий. Он основан на изменении свойств обрабатываемого материала в результате ионной бомбардировки, облучения и ввода в тело некоторого количества энергии. Изменения, происходящие под действием потоков излучения, целесообразно использовать для технологической обработки, чтобы изменять размеры тела, химический состав поверхности, придавать материалу поверхностного слоя определенные 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.

Анализ последних исследований и публикаций

Процесс ЭЭЛ начинается со сближения анода (электрода) с катодом (деталью). При расстоянии между ними равном пробивному начинается развитие искрового разряда. После пробоя межэлектродного промежутка на поверхности образуются локальные очаги плавления, испарения, вызывающие электрическую эрозию материалов электродов (анода и катода). Преимущественный перенос эродируемого материала анода на катод обеспечивает формирование на нем измененного поверхностного слоя, который при воздействии на него травителей, используемых для выявления микроструктуры материалов электродов, остается "белым", т.е. структура его не выявляется. Образование "белого" слоя происходит в условиях локального действия высоких температур и давлений, влияния дефектов структуры, мартенситного превращения [1]. 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 кристаллиза-

ция, фазовые превращения, диффузия и химическое взаимодействие, сопровождающее процесс ЭЭЛ, приводят к образованию крайне неравновесных структур, высокой гетерогенностью по составу, структуре и свойствам. Твердость такого слоя, как правило, значительно превосходит твердость материалов электродов. В нем действуют напряжения, превосходящие внутренние напряжения в материалах анода и катода [2, 3].

Совершенствованию технологии ЭЭЛ уделяется большое внимание как на Украине, так и в странах ближнего и дальнего зарубежья. Особый интерес представляет работа [4], в которой описан способ нанесения покрытий вращающимся электродом, а процесс ЭЭЛ происходит без соприкосновения электрода с деталью.

Несмотря на большое число исследований, проведенных в области ЭЭЛ металлических поверхностей, до настоящего времени нет достаточно достоверных, подтвержденных экспериментом сведений о качественном и количественном состоянии поверхностных слоев сталей с различным содержанием углерода при контактном и безконтактном ЭЭЛ.

Формулирование целей статьи (постановка задачи). Целью работы является исследование качественного и количественного состояния поверхностных слоев на подложках из стали 45 и 12Х18Н10Т в зависимости от материала легирующего электрода при контактном и безконтактном ЭЭЛ.

Изложение основного материала исследования.

Методика экспериментальных исследований

Формирование поверхностных слоев выполнялось контактными и бесконтактными способами ЭЭЛ на установке с ручным вибратором модели «ЭИЛ - 8А» и механизированной установке модели «Элфа-541». Основные режимы установки «ЭИЛ - 8А» приведены в табл. 1. Для емкости накопительного конденсатора $C = 20$ мкФ и $C = 300$ мкФ установка имеет по 8 режимов работы.



а

б

Рисунок 1 – Установки ЭЭЛ: а - с ручным вибратором модели «ЭИЛ - 8А»; б - механизированная установка модели «Элфа-541».

Таблица 1 - Режимы работы установки «ЭИЛ - 8А»

Номер режима	U _{х.х.} В	J _{кз.} А		Производительность t, см ² / 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

ЭЭЛ образцов из стали 45 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т осуществлялось вольфрамом и медью.

С целью изучения процессов формирования поверхностных слоев при бесконтактном ЭЭЛ использовали механизированную установку типа «Элфа-541» (рис. 1, б). В связи с тем, что глубина ЭЭЛ слоев, сформированных на этой установке небольшая (10...15 мкм), для увеличения длины исследуемого участка слоя изготавливали косые шлифы под $\angle 25^\circ$. При ЭЭЛ образцов из стали 45 и 12Х18Н10Т в качестве электродов использовали медь М1, вольфрам. 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 мин⁻¹ оборотов.

Исследование поверхностного слоя образцов, упрочненных на ручной установке "ЭИЛ - 8А", проводилось на растровом электронном микроскопе-анализаторе "РЭММА - 200", а образцов, обработанных на механизированной установке "Елфа - 541", - на растровых электронных микроскопах "BS-350" Чехословацкой фирмы "Тесла" и "РЭМ - 100". При этом проводился топографический анализ наиболее характерных участков поверхности и качественный рентгенов-

ский микроанализ сформированного покрытия для идентификации основных элементов в нем. Просмотр и съемка топографии 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_α - серии для элементов Cu, Fe, Ni, Cr и L_α - серии W, с развертыванием интенсивности излучения этих элементов на экране электронно-лучевой трубки кинескопа и фотосъемкой при линейном сканировании электронного зонда по поверхности объекта.

Результаты исследований

Топография и качественный состав поверхностного слоя, сформированного при помощи установки с ручным вибратором модели «УИЛВ-8», исследовались на образцах из стали 45 и 12Х18Н10Т. 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 рисунках 1-3.

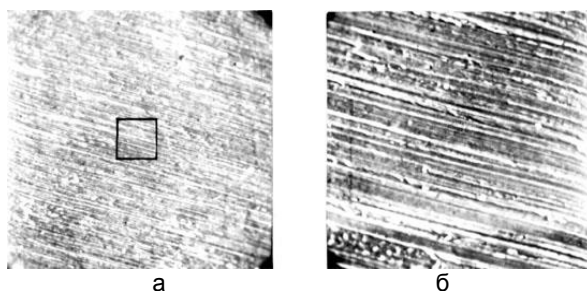


Рисунок 1 – Текстура участка поверхности стали 12X18H10T: а - x100, б - x1000

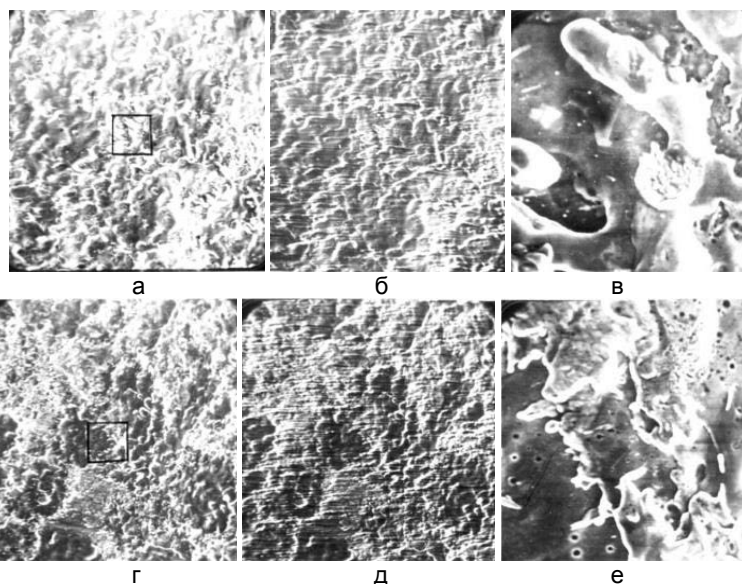


Рисунок 2 – Текстура участка поверхности стали 45, легированной вольфрамом (а – x100), (б – x100, Y- модуляция), (в – x1000) и медью (г – x100), (д – x100, Y- модуляция), (е – x1000)

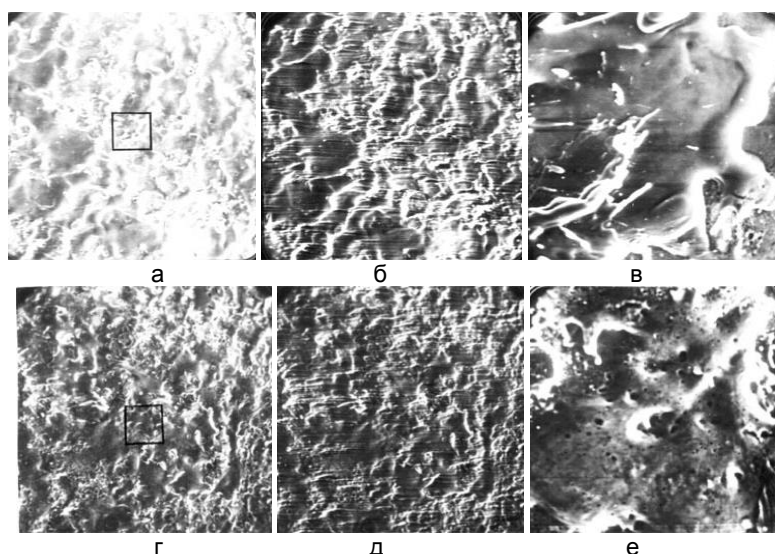


Рисунок 3 – Текстура участка поверхности стали 12X18H10T, легированной вольфрамом (а – x100), (б – x100, Y- модуляция), (в – x1000) и медью (г – x100), (д – x100, Y- модуляция), (е – x1000)

Текстура поверхности образца подложки после шлифования (рис. 1) состоит из параллельных бороздок глубиной от 1...2 до десятых долей мкм, вытянутых в направлении шлифовки. При большем увеличении x1000 (рис. 1, 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 растекшегося 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 (рисунки 2 и 3, г, д, е) с более развитой поверхностью по сравнению с вольфрамовым электродом (рисунки 2 и 3, а, б, в), что вызвано мелкокапельным массопереносом меди и большим перегревом капель жидкого металла, о чем свидетельствует повышенная микропористость слоя (рисунки 2 и 3, 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. 2) по сравнению со сталью 12Х18Н10Т (рис. 3). Это можно объяснить различными теплофизическими свойствами сталей, а значит и скоростью отвода тепла от подложки (т.е. скоростью охлаждения жидкого металла на подложке из стали 45 выше, чем для стали 12Х18Н10Т). Следовательно, при ЭЭЛ одноименными металлами большая шероховатость будет в покрытиях, сформированных на подложках с большей теп-

лопроводностью (в данном случае у стали 45).

Таким образом, проведенный топографический анализ показал, 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 ХРИ (рис. 4), 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 протяженности линии сканирования ~ 350 мкм по поверхности слоя фиксируются основные элементы легирующего электрода и подложки, и только в местах отсутствия слоя резко падает интенсивность излучения основного элемента электрода с увеличением интенсивности основных элементов подложки (рис. 4, г).

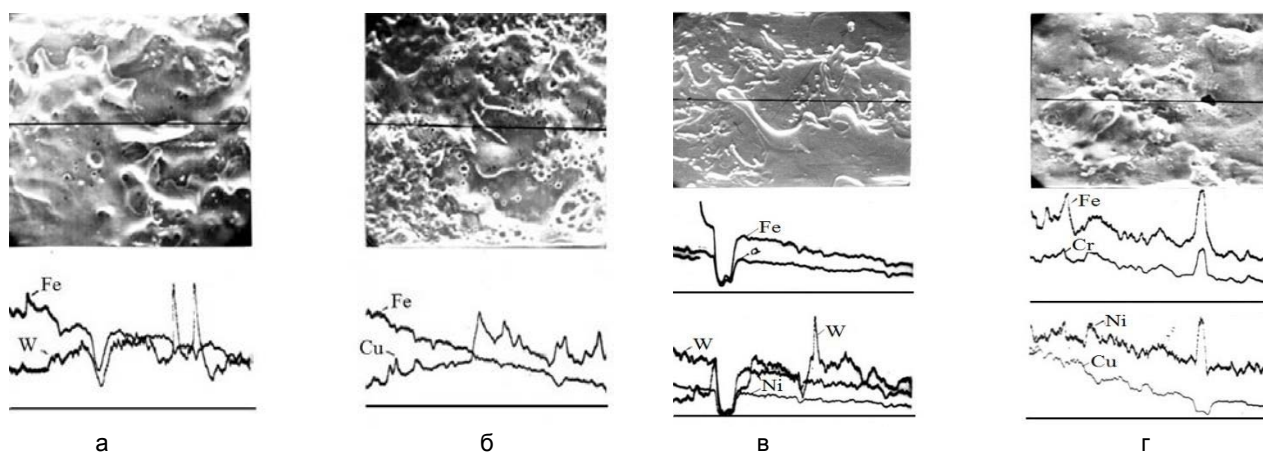


Рисунок 4 – Содержание основных элементов в поверхностном слое стали 45 и 12Х18Н10Т после ЭЭЛ, соответственно: вольфрамом (а, в) и медью (б, г); x325.

Как видно из фрактограмм поверхностей образцов, легированных на механизированной установке ЭЭЛ "Элфе-541", медью и вольфрамом (рис. 5), их рельеф имеет волнообразное строение, образованное скоплением гребней и впадин различных размеров закристаллизовавшегося металла. Сплошность покрытий на всех образцах ~ 100%.

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

В плоскостной размерности гребней и впа-

дин отличается следующее: основа сталь 45 – размерность гребней и впадин одинаковая для медного и вольфрамового электрода; основа сталь 12Х18Н10Т – размерность гребней и впадин одинаковая для всех перечисленных электродов.

При легировании медью и вольфрамом стали 45 в слое, кроме материала легирующего электрода, содержится соответственно до 5...6 и 25...30 железа, а толщина слоя и диффузионная зона соответственно равны ~9,5; 7,2 мкм и ~1,0; 1,0 мкм.

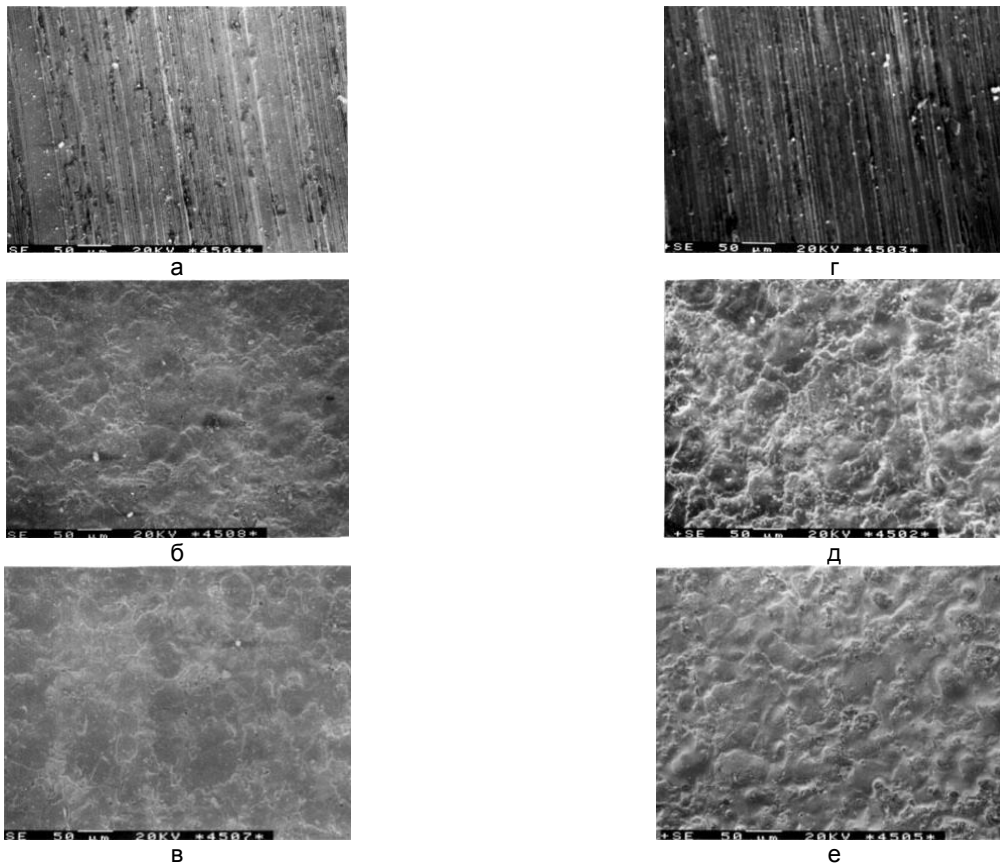


Рисунок 5 – Топография поверхности образцов из стали 45 и 12X18H10T (x130) до (а, г) и после ЭЭЛ медью (б, д), вольфрамом (в, е) соответственно на установке "Элфа - 541"

При легировании стали 12X18H10T вольфрамом в состав поверхностного слоя, кроме вольфрама и кобальта, входят никель, хром и железо в количествах соответственно (в вес.%):

до 5%Ni, 8%Cr и 30%Fe, остальное- вольфрам; толщина слоя и диффузионной зоны соответственно равны ~ 20,5; 5,0...6,0 мкм (см. табл. 1).

Таблица 1 – Ориентировочные данные размеров ЭЭЛ слоя и процентного содержания основных элементов в нем

Материал		Толщина, мкм		Содержание основных элементов, в вес. %				
основы	электрода	слоя	диффузионной зоны	Fe	Ni	Cr	Cu	W
	Медь	9,5	1,0	5-6	-	-	ост.	-
Сталь 45	Вольфрам	7,2	1,0	25-30	-	-	-	ост.
	Медь (а)*	11,6	<1,0	14,5	2-2,5	4	ост.	-
Сталь	Медь (б)*	18,5	2,0...3,0	4	1	1,5	ост.	-
12X18H10T	Вольфрам	20,5	5,0...6,0	30	5	8	-	ост.

* а и б – различные линии сканирования

Таким образом, исследование топографии поверхности и распределения химических элементов в поверхностном слое, сформированном как на установке с ручным вибратором, когда массоперенос происходит преимущественно при непосредственном контакте электродов, так и на механизированной установке, когда массоперенос осуществляется бесконтактным способом, показали, что на формирование ЭЭЛ слоя преимущественное влияние оказывает материал электродов как анода, так и катода. Меньшая шероховатость отмечается на подложках с более низким коэффициентом теплопроводности и при ЭЭЛ электродами с меньшей температурой плавления.

При бесконтактном легировании в период разряда происходит нагрев поверхности анода и катода до температуры кипения и испарения, а также направленный полярный перенос элементов анода на катод. При контактном легировании дополнительно имеет место интенсивное гидродинамическое перемешивание жидких фаз анода и катода при контакте электродов. Этим и объясняется формирование более массивных поверхностно-легированных слоев при ЭЭЛ на установках с ручным вибратором.

Изучение распределения элементов в поверхностном слое показало, что в обоих случаях ЭЭЛ, как контактном, так и бесконтактном, в поверхностный легированный слой входят элемен-

ты анода и катода.

Высокая адгезионная связь сформированных электроэрозионных покрытий с основой объясняется не только интенсивным перемешиванием материалов электродов в жидкой фазе, но и диффузией материала анода в катод в твердой фазе. Подтверждением этого является наличие зоны перехода от «белого» слоя к основе даже при ЭЭЛ бесконтактным способом (см. табл. 1).

Выводы:

1. 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.

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

Список використаної літератури:

1. Электроискровое легирование металлических поверхностей / [Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревутский В.М.] – Кишинев: Штинца, 1985. – 196 с.
2. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. – К.: Техника, 1982.- 181 с.
3. Коробейник В. Ф., Рудюк С. И., Коробейник С. В. Особенности формирования микротопографии, структуры и субструктуры поверхностного слоя при электроискровом легировании // Электронная обработка материалов.- 1989.- № 1.- С. 15-17.
4. Способ электроэрозионного нанесения покрытий: А. с. 691269 НРБ, МКИ В 23 Р 1/18 / Богомил Тотев Антонов (НРБ).- № 1858841/25-08; Заявлено 27.11.72; Оpubл. 15. 10. 79, Бюл. № 38.- 2 с.

Думанчук М.Ю., Волошин І. Є. РЕНТГЕНОСТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ПРИ КОНТАКТНОМУ І БЕЗКОНТАКТНОМУ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ ЛЕГУВАННІ

Представлені результати досліджень впливу режимів і матеріалів легуючих електродів на якісний і кількісний стан поверхневих шарів на підкладках з вуглецевої і високолегованої хромо-нікелевої сталі. Сформульовано рекомендації, які дозволять призначати режими електроерозійного легування, щоб забезпечити отримання заданих параметрів поверхневого шару.

Ключові слова: *якість поверхні, поверхневий шар, рентгеноструктурний аналіз, товщина шару, електроерозійне легування.*

Dumanchuk M.Yu., Voloshin I.E. X-RAY STRUCTURAL ANALYSIS OF SURFACE LAYERS AT CONTACT AND NON-CONTACT ELECTROEROSIONAL ALLOYING

Electroerosional alloying (EEA) method relates to treatment of materials electrophysical methods, based on the use of the concentrated energy flow and can be quite promising for hardening and protective coating. It is based on changing of processed material properties by ion bombardment, irradiation, and input into the physical body a certain amount of energy.

The changes that occur under the influence of radiation fluxes should be used for processing, to change the size of the physical body, change the chemical composition of the surface material, and give specific properties of the surface layer. Therefore, research and analysis of the processes occurring at the electrodes, allows you to not only the general physical picture of the EEA, but also to evaluate its technological capabilities, as well as to find new areas of application.

Presented the research results of alloying electrodes modes and materials influence to the qualitative and quantitative status of surface layers on the carbon and high-chromium-nickel steel basis. Formulated EEA modes specify recommendations, that can providing of surface layer set parameters reception.

Micro-X-ray-spectral analysis determined that both in contact and non-contact EEA surface layer consists of anode and cathode elements. The presence of the diffusion layer is observed in both cases of EEA. The surface topography research's shows that the smaller the roughness observed on the basis with lower thermal conductivity and at EEA with low melting point electrodes.

Keywords: *surface quality, surface layer, X-ray structural analysis, layer thickness, electroerosional alloying.*

Стаття надійшла в редакцію: 05.09.2016

Рецензент: д.т.н., проф. Антошевский Б.