

А.Д. Верхотуров*, Ю.И. Мулин*, Е.С. Астапова**, В.А. Агапатов***,
М.И. Щетинин***, А.В. Козырь*, В.В. Соловьев***

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОКРЫТИЙ

**Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН,
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия*

***Амурский комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН
пер. Релочный 1, г. Благовещенск, 675006, Россия*

****Амурский государственный университет,
Игнатьевское шоссе, 21, г. Благовещенск, 675006, Россия*

Введение

В настоящее время интенсивно исследуются процессы образования упрочняющих покрытий методом электроискрового легирования (ЭИЛ). Под воздействием низковольтных импульсных электрических разрядов и за счет химического взаимодействия материалов электродов на катоде формируется измененный поверхностный слой с уникальным комплексом свойств, обеспечивающих значительное повышение многих эксплуатационных характеристик [1]. Одним из факторов, способствующим повышению износостойкости, является субструктурное упрочнение композиции, состоящей из материала поверхностного слоя подложки и легирующих элементов [2]. Оно связано со спецификой протекания микрометаллургических процессов в зоне действия разряда при ЭИЛ и существенно влияет на физико-химические характеристики покрытий [3].

Наряду с химическим и фазовым составом поверхностного слоя параметры тонкой кристаллической структуры оказывают влияние на твердость и предел текучести материала, определяют механизм и величину износа при трении [2]. Субструктура позволяет выявить соотношение факторов деформационного упрочнения и термического возврата в материале при термопластическом воздействии импульсного разряда. Целью данной работы является определение возможности управления степенью упрочнения поверхностных слоев металлов методом ЭИЛ путем изменения энергетических параметров процесса, изучение особенности формирования субструктуры в поверхностном слое электродами из материалов с различным элементным составом, типом кристаллической решетки и влияния степени упрочнения на износостойкость покрытий.

Материалы и методика исследования

Образцы из стали 45 и P18 имели форму параллелепипеда с основанием 10×10 мм толщиной 5 мм. Легирование образцов осуществлялось на установке "Элитрон 16" при значениях средней энергии искрового разряда $W_u = 0,043; 0,103; 0,240$ Дж и времени легирования $t = 1 - 3$ мин/см². Эталонами служили исходные образцы, отожженные при 900°С. В качестве электродов применяли: Ti, Ni, Cu, W, твердые сплавы ВК6М и Т15К6. Исследовались также образцы после последовательного упрочнения сплавом Т15К6 и Cu. Рентгеновская съемка выполнена на дифрактометре ДРОН-3М с фокусировкой по Бреггу–Брентано на Cu K_α излучении методом Дебая–Шеррера. Для ограничения расхождения пучка использовали щели 2, 4, 0,25 мм и щели Соллера. Скорость вращения гониометра составляла 1 град/мин при съемке рентгенодифрактометрического спектра стали и 0,25 град/мин при съемке отдельных дифракционных линий для расчета параметров тонкой структуры. Скорость счета – $1 \cdot 10^3$ имп/с, постоянная времени – 2,5 с. Влиянием шероховатости можно пренебречь ввиду малых значений ее параметров [4]. Уширение дифракционных линий в легированных образцах стали вызва-

но как возникающими микронапряжениями, так и изменением (увеличением) степени дисперсности структуры. При представлении величины физического уширения β , состоящего из частей m и n , обусловленных соответственно уменьшением размеров блоков и микронапряжениями в них, известна следующая зависимость:

$$\beta = \frac{m \cdot n}{\int_{-\infty}^{+\infty} M(x) \cdot N(x) dx},$$

где $M(x)$, $N(x)$ – рентгеновские профили, обусловленные малостью блоков и микронапряжениями.

При разделении указанных эффектов использован "с-критерий", – наиболее точное совпадение теоретического и экспериментального значения, который был получен с помощью функции Лауэ вида $\sin^2(kx)/(kx)^2$ [5–7]. Параметры субструктуры определяли с помощью графического метода Холла и по уравнениям

$$D = \frac{3\lambda m/n}{\beta(3m/n - 1) \cos \theta},$$

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\beta(3m/n - 1)}{12 m/n \cdot \text{tg} \theta},$$

где θ – угол отражения [8].

Изменяемыми параметрами технологического процесса, определяющими степень упрочнения, являлась приведенная энергия – W_n искровых разрядов при легировании подложки площадью 1 см^2 при частоте следования импульсов $f_u = 600 \text{ Гц}$. Численно величина рассчитывалась как $W_n = W_u \cdot N_u \cdot t = W_u (60f_u \cdot K_u) \cdot t$ где N_u – среднее количество импульсов за 1 мин; t – время легирования 1 см^2 поверхности; $K_u = N_u/f_u$ – коэффициент, определяющий вероятность прохождения искрового разряда [9]. С повышением времени легирования W_n линейно увеличивается. ДюрOMETрический анализ упрочненных слоев выполнен с помощью микротвердомера ПМТ-3.

Сравнительные испытания покрытий на износостойкость выполнены в соответствии с ГОСТ 23.222-84 на машине трения МТ-22П под нагрузкой 100 Н по схеме "вал – колодка" при скорости скольжения вращающегося диска по образцу 0,25 м/с в условиях граничного трения с подводом смазки "Индустриальное 20". Вращающийся диск был изготовлен из закаленной стали 40Х (HRC 62 – 64). Износостойкость покрытий оценивалась по сравнению с износом образцов без покрытия через каждые 5 км испытания на базовом пути трения 20 км взвешиванием образцов на весах ВЛР-200.

Результаты и обсуждение

После сравнения экспериментальных данных по межплоскостным расстояниям и интенсивностям дифракционных максимумов для используемых режимов легирования теоретических данных [10] определены значения по средним размерам блоков D и средней величине микроискажений $\Delta d/d$, которые приведены в табл. 1. Анализ результатов показывает, что нелинейные закономерности изменений в субмикроструктуре поверхностного слоя в зависимости от величины приведенной энергии при выполнении процесса ЭИЛ имеют одинаковый характер. Влияние типа кристаллической решетки материала анода на изменение субмикроструктуры поверхностных слоев не установлено. Размер блоков в исследуемых сталях до обработки ЭИЛ составляет $D = 800 - 950 \text{ \AA}$. В начальный период обработки они значительно уменьшаются до $200 - 600 \text{ \AA}$ в зависимости от используемых материалов электродов. Полученные закономерности определяют наличие точек минимума, которые для электродных материалов Ni и Cu при значении $W_n = 5,9 \text{ кДж/см}^2$ приближаются к размерам блоков 150 \AA , обеспечивающих сочетание высоких прочностных и пластических свойств поверхностных слоев. Повторное упрочнение Cu образцов из стали P18 после их легирования твердым сплавом T15K6 значительно способствует образованию мелкодисперсной структуры. При дальнейшем продолжении ЭИЛ размеры блоков стабилизируются.

Величины микроискажений в поверхностных слоях стальных подложек до обработки ЭИЛ составляют $(1-2) \cdot 10^{-3}$. В начальный период обработки микроискажения увеличиваются до $(1,3 - 3,8) \cdot 10^{-3}$ и при продолжении ЭИЛ до $W_n = 5,9 \text{ кДж/см}^2$ повышаются до $(2,5 - 4,5) \cdot 10^{-3}$. При дальнейшем продолжении процесса значения микроискажений уменьшаются незначительно (стабилизируются). Для подложек из стали P18 с последовательной обработкой T15K6 и Cu изменение микроискажений максимально на последнем этапе.

Исследованиями установлены изменения значений микротвердости указанных выше субструктур в поверхностном слое в зависимости от энергетического параметра W_n (табл. 2).

Таблица 1. Результаты исследования субмикроструктуры поверхностного слоя от энергии воздействия при ЭИЛ

Величина приведенной энергии, W_n , Дж/см ²	Материал электродов для ЭИЛ													
	подложка – сталь 45										подложка – сталь P18			
	Ti		Ni		Cu		W		BK6M		T15K6		T15K6+Cu	
	$D, \text{Å}$	$\frac{\Delta d}{d} \cdot 10^{-3}$	$D, \text{Å}$	$\frac{\Delta d}{d} \cdot 10^{-3}$	$D, \text{Å}$	$\frac{\Delta d}{d} \cdot 10^{-3}$	$D, \text{Å}$	$\frac{\Delta d}{d} \cdot 10^{-3}$	$D, \text{Å}$	$\frac{\Delta d}{d} \cdot 10^{-3}$	$D, \text{Å}$	$\frac{\Delta d}{d} \cdot 10^{-3}$	$D, \text{Å}$	$\frac{\Delta d}{d} \cdot 10^{-3}$
2,5	370	3,2	260	3,6	280	3,6	400	1,3	550	1,5	600	2,5	400	3,8
5,9	230	3,8	195	4,6	250	3,7	–	–	300	2,5	520	3,2	360	4,2
17,3	–	–	200	4,2	275	3,5	–	–	–	–	560	2,6	360	2,7

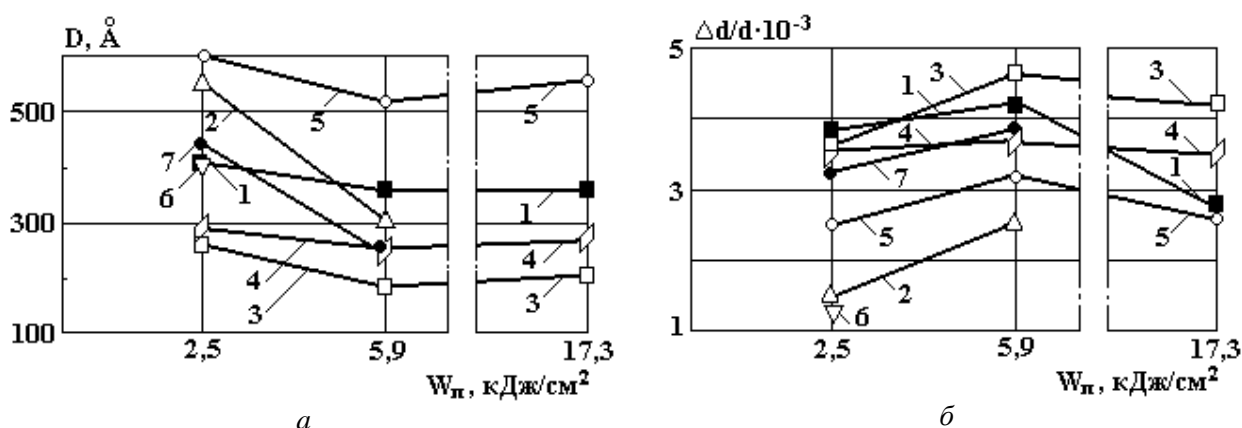


Рис. 1. Зависимости средних размеров блоков D (а) и средних значений микроискажений $\Delta d/d$ (б) поверхности покрытий от значений приведенной энергии W_n при ЭИЛ для материалов электродов: 1 – T15K6+Cu, 2 – BK6M, 3 – Ni, 4 – Cu, 5 – T15K6, 6 – W, 7 – Ti

Таблица 2. Усредненные значения микротвердости поверхностного слоя образцов в зависимости от энергии воздействия при ЭИЛ

Величина приведенной энергии, W_n , кДж/см ²	Материал электродов для ЭИЛ						
	подложка – сталь 45				подложка – сталь P18		
	Ti	Ni	Cu	W	BK6M	T15K6	T15K6+Cu
	Микротвердость $H_{ц}$, МПа						
2,5	5920	3100	860	7500	7800	9300	970
5,9	6230	4010	920	–	8300	10800	1080
17,3	–	2710	820	–	–	7410	1030

Закономерности изменения микротвердости поверхностных слоев образцов в зависимости от энергии воздействия при ЭИЛ адекватны закономерностям изменения средних величин микроискажений. Наибольшие значения микротвердости поверхностей в процессе ЭИЛ получены при $W_n = 5,9$ кДж/см².

Результаты сравнительных испытаний на износ при значениях приведенной энергии процесса $W_n = 2,5; 5,9; 17,3$ кДж/см² в зависимости от пути трения приведены на рис.2. Меньшие величины износа образованных покрытий получены при значениях приведенной энергии процесса $W_n = 5,9$ кДж/см² (рис. 2,б) при соответствии меньшим средним значениям блоков, достаточно высокой величины микроискажений и микротвердости поверхности. При этом установлено, что меньшие значения величины износа на пути трения $L = 20$ км имеют покрытия, не обладающие наибольшей микротвердостью.

Наименьший износ получен для поверхностей при последовательном легировании электродами T15K6 и Cu ($U = 50$ г/м²). Эти результаты объясняются положительным градиентом механических

свойств по глубине поверхности образованного покрытия $d\sigma_x/dz > 0$, где σ_x – разрушающее напряжение в направлении плоскости касания, z – координата, перпендикулярная к плоскости касания [11]. По мере увеличения износа остальные материалы электродов можно ранжировать в следующем порядке: ВК6М, Ni, Cu, T15K6, W, Ti. Основные триботехнические характеристики поверхностей, легированных указанными электродными материалами при значении приведенной энергии $W_n = 5,9$ кДж/см², представлены в табл. 3.

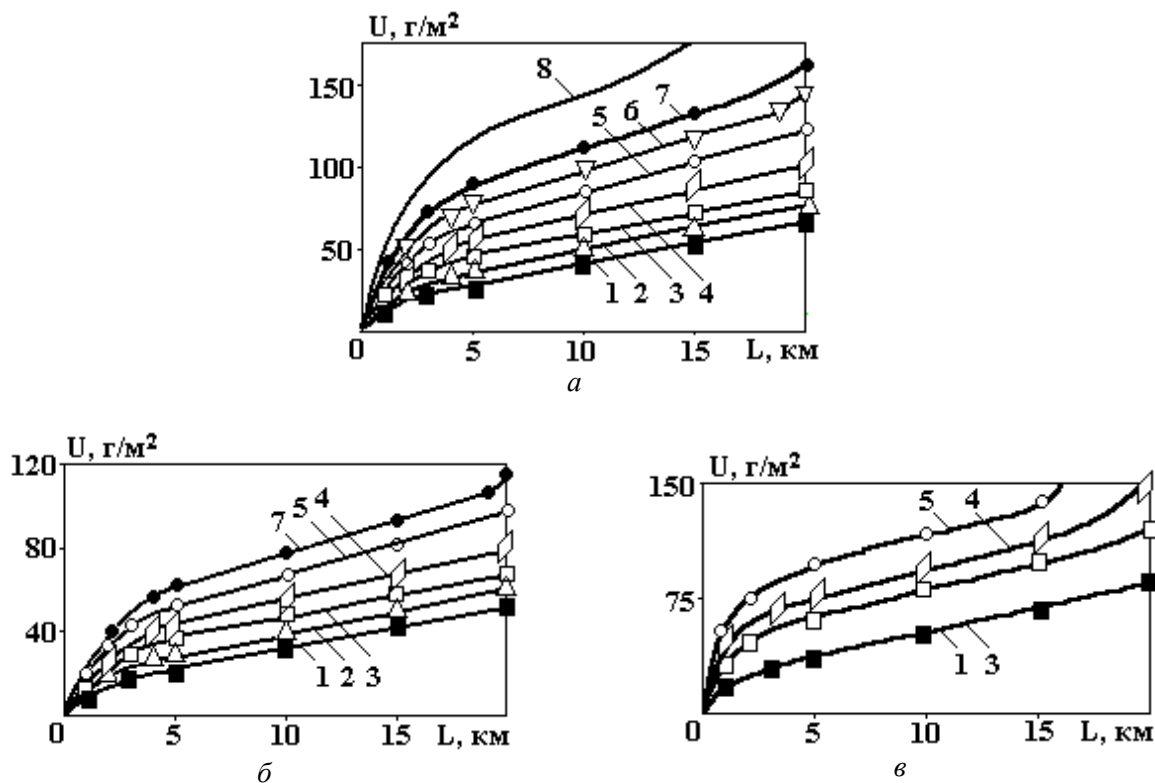


Рис. 2. Зависимости величин износа поверхностей от путей трения для покрытий, образованных ЭИЛ при значениях приведенной энергии W_n : а – 2,5 кДж/см², б – 5,9 кДж/см², в – 17,3 кДж/см² для материалов электродов: 1 – T15K6+Cu, 2 – ВК6М, 3 – Ni, 4 – Cu, 5 – T15K6, 6 – W, 7 – Ti, 8 – Сталь 45 без покрытия

Таблица 3. Триботехнические характеристики поверхностей после ЭИЛ при значении приведенной энергии $W_n = 5,9$ кДж/см²

Триботехнические характеристики	Материал электрода					
	подложка – сталь 45				подложка – сталь P18	
	Ti	Ni	Cu	ВК6М	T15K6	T15K6+Cu
Средняя величина участка приработки, $L_{пр}$, км	3,80	2,20	2,21	2,00	3,10	1,50
Средняя величина участка нормального износа, L_n , км	15,2	17,8	17,8	18,0	16,9	18,5
Коэффициент трения, f_n	0,28	0,24	0,22	0,24	0,26	0,19
Скорость изнашивания поверхности, J_n , г/м ² ·км	3,55	2,70	2,91	2,39	3,31	2,16
Повышение износостойкости по сравнению с неупрочненной поверхностью, раз	1,58	2,07	1,92	2,34	1,69	2,60

Анализ результатов испытаний на износ и полученных триботехнических характеристик поверхностей после ЭИЛ свидетельствует о их взаимосвязи с параметрами формируемой субструктуры: средними размерами блоков и величинами микроискажений кристаллической решетки. Параметры субструктуры значительно влияют на величину участка приработки и нормального износа поверхно-

сти, коэффициента трения и скорости изнашивания поверхностей, обеспечивая повышение износостойкости по сравнению с неупрочненными поверхностями от 1,58 до 2,6 раза.

Выводы

1. Размеры блоков и величина микроискажений кристаллической решетки существенно зависят от величины приведенной энергии процесса ЭИЛ, причем каждый электродный материал имеет свою минимальную величину блоков и наибольшие значения микроискажений.

2. Энергетический параметр процесса ЭИЛ – приведенная величина энергии неаддитивно влияет на параметры субмикроструктуры поверхностного слоя, износ и триботехнические характеристики.

3. Установлена взаимосвязь состава, субмикроструктуры электродных материалов, энергетических параметров процесса ЭИЛ со степенью упрочнения, износом и триботехническими параметрами формируемых поверхностных слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мулин Ю.И., Верхотуров А. Д. Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья. Владивосток, 1999.
2. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М., 1982.
3. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев, 1985.
4. Клевцов Г.В., Швец Г.Б. Рентгенографический анализ как метод исследования изломов // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., 1986. Вып. 35. С. 3 – 11.
5. Иверонова В.И., Ревкевич Г.П. Теория рассеяния рентгеновских лучей. М., 1972.
6. Любушкин В.А., Любушкина Л.М. Применение функции Лауэ в методе аппроксимации // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., 1983. Вып. 31. С.80 – 84.
7. Смыслов Е.Ф., Нагорнов В.П. Простой критерий выбора аппроксимирующих функций // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., 1985. Вып. 34. С.140 – 141.
8. Нагорнов В.П. Формулы для определения размеров блоков и величины микроискажений с помощью функции Лауэ // Аппаратура и методы рентгеновского анализа. Л., 1983, С. 75 – 80.
9. Мулин Ю.И., Климова Л.А., Ярков Д.В. Феноменологическое описание закономерностей формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 3. С. 50 – 56.
10. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. М., 1961.
11. Справочник по триботехнике / Под общей ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. Т. 1. Теоретические основы. М., 1989.

Поступила 25.09.03

Summary

Analysis of structure of 45 and R18 – type steels surface layer hardened by electrospark alloying with Ti, Ni, Cu, W, WC₆, TiC₁₅Co₆ hard alloy was made. Effect of process energy on crystal thin structure parameters was studied by Auger spectroscopy and the increasing of wear-resistance.
