

На правах рукописи

ЯРКОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ
ЭИЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА**

Специальность: 05.02.01 – материаловедение (машиностроение)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2004

Работа выполнена в институте материаловедения
Хабаровского научного центра ДВО РАН

Научный руководитель: заслуженный изобретатель РФ,
кандидат технических наук, доцент
Мулин Юрий Иванович

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Ри Хосен

кандидат технических наук,
Злыгостев Алексей Михайлович

Ведущая организация: ОАО "Дальневосточный научно-
исследовательский институт технологии
судостроения" (ДВНИИТС)

Защита состоится 4 июня 2004 года в 12 часов на заседании диссертационного
совета ДМ 212. 092. 01 в Комсомольском-на-Амуре государственном техниче-
ском университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре
государственного технического университета

Автореферат разослан 30 апреля 2004 г.

Отзывы высылаются в адрес диссертационного совета, в 2-х экз., заверенные
печатью

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



А. И. Пронин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Достижение высокой износостойкости и жаростойкости рабочих поверхностей деталей и инструментов является актуальной проблемой, которая может быть решена развитием и внедрением в производство новейших методов упрочнения, путем изменения физико-химических свойств рабочих поверхностей деталей.

Одним из методов формирования функциональных покрытий на металлических поверхностях является электроискровое легирование (ЭИЛ), разработанное российскими учеными Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко. Метод ЭИЛ основан на действии низковольтных электрических разрядов в газовой среде, при этом осуществляется эрозия материала анода, его перенос, диффузия, образование на катоде измененного поверхностного слоя (ИПС). Значительное улучшение эксплуатационных свойств деталей обеспечивается правильным выбором состава, структуры электродных материалов, а также параметров технологического процесса. Взаимосвязь явлений на аноде и катоде с эксплуатационными свойствами покрытия, принципы создания электродных материалов для ЭИЛ, а также критерии их выбора обобщены и систематизированы в трудах Г. В. Самсонова и А. Д. Верхотурова. Вместе с тем, проблемы получения и использования новых электродных материалов для образования качественных электроискровых покрытий с высокими эксплуатационными характеристиками не исчерпаны.

Возможность нанесения на обрабатываемую поверхность любых токопроводящих материалов, высокая прочность сцепления нанесенного материала с основой позволяет методом ЭИЛ изменять механические, теплофизические, электрические и другие свойства рабочих поверхностей.

Однако, этот метод обладает и рядом недостатков, сдерживающих его широкое применение в производстве, такими как относительно малая и неравномерная толщина формируемого слоя, его пористость, шероховатость, невысокая производительность процесса, а также преимущественное использование дорогих электродных материалов - твердых сплавов, обладающих низкой эрозионной способностью.

Эти проблемы частично решаются в работе следующими путями: созданием и применением новых эффективных электродных материалов; формированием многослойных покрытий; разработкой и применением новой конструкции установки ЭИЛ.

Механизация процесса ЭИЛ позволяет расширить возможности этого метода, более эффективно использовать влияние электрических и технологических характеристик установок при выполнении процесса. Проблема создания оборудования, обеспечивающего выполнение механизированного процесса электроискрового легирования, остается актуальной.

Исследования проводились с 1993 по 2000 гг. в Институте материаловедения ХНЦ ДВО РАН. В 1993-1997 гг. выполнялись научно-исследовательские работы по программе ГКНТП 06.01.05 по теме: "Разработка новых технологий нанесения защитных и упрочняющих покрытий, восстановление деталей машин и механизмов на основе комплексного использования минерального сырья Дальневосточного региона". В 1996-2000 гг. работы проводились по теме: "Разработка научных основ и высоких технологий создания покрытий методом электроискрового легирования" (№ гос. регистрации 01.9.60.001426).

Цель работы. Исследование процесса формирования функциональных покрытий методом ЭИЛ электродными материалами, в том числе полученными из вольфрамсодержащего минерального сырья, с разработкой оборудования, технологии упрочнения и восстановления рабочих поверхностей деталей машин.

Для достижения поставленной цели последовательно решались задачи:

1. Исследование зависимости массопереноса, формирования ИПС электродными материалами, в том числе полученными из минерального сырья, от энергетических параметров процесса ЭИЛ.

2. Определение взаимосвязи механических и энергетических параметров процесса при механизированном ЭИЛ, а также создание универсальной конструкции установки для ЭИЛ с расширенными технологическими возможностями работы в механизированном режиме.

3. Разработка технологических основ формирования многослойных покрытий, правил подбора и использования электродных материалов с учетом

физико-химических свойств компонентов и заданных эксплуатационных требований.

Научная новизна работы.

1. Определены зависимости массопереноса, формирования структуры легированного слоя и его свойств новыми электродными материалами, полученными из минерального сырья ДВ региона от суммарной величины энергии искровых разрядов Q , позволяющие установить границы окончания процесса ЭИЛ при значении энергии $Q_m = (0,5-0,7)Q_x$ с учетом эффективности затрачиваемой энергии $\Sigma\Delta^k_x/Q_x$ и себестоимости процесса $Q_x/\Sigma\Delta^k_x$.

2. Предложен параметр A экспоненциально-степенной зависимости массопереноса от суммарной величины энергии искровых разрядов $\Sigma\Delta^k = A \cdot Q^b \cdot \exp(c \cdot Q)$ для оценки предпочтительности выбора материалов электродов наравне с критерием D_m , предложенного Верхотуровым А.Д.

3. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена взаимосвязь механических и энергетических параметров механизированного процесса ЭИЛ с учетом равномерности расположения электроискровых лунок; с уменьшением продольной подачи, увеличением частоты вращения детали и диаметра детали необходимо увеличивать и частоту следования искровых разрядов с целью обеспечения сплошности и равномерности толщины образуемых покрытий.

4. Уточнены требования, предъявляемые к материалам электродов для формирования покрытий толщиной более 200 мкм, с учетом не только высокой коррозионной стойкости электродного материала в условиях повышенных температур и образования с материалом основы неограниченных твердых растворов, но и формирования фаз внедрения при образовании химических соединений, а также определен критерий выбора последовательности применения электродных материалов при образовании многослойных покрытий с учетом параметра A , предложенной экспоненциально-степенной зависимости – $A^1 > A^2$ (индексы - порядок применения материалов).

Практическая значимость работы. Проведенные исследования способствуют дальнейшему развитию метода электроискрового легирования. Полученные закономерности массопереноса от суммарной величины энергии искровых разрядов и разработанные рекомендации по выбору электродных материа-

лов позволяют прогнозировать состав и толщину покрытий в реальных технологических процессах.

На Хабаровском станкостроительном заводе с использованием новых электродных материалов внедрены технологические процессы упрочнения режущих инструментов, обеспечивающие повышение долговечности работы резцов, сверл, метчиков в 2-3 раза, ножей фрез для деревообработки в 5-7 раз. Годовой экономический эффект от внедрения составил 1 500 тыс. рублей (в ценах 1996 года). В НПП «Булат», г. Хабаровск проведены производственные испытания восстановленных и упрочненных рабочих поверхностей деталей машин: валов турбонагнетателей и винтовых насосов. Увеличение срока службы данных деталей в среднем на 50 %. В дорожных электротехнических мастерских ст. Вяземская Хабаровского края создан участок механизированного ЭИЛ на основе разработанной высокочастотной установки ИМ101. Экономическая эффективность от внедрения составила 30 тыс. рублей в год (в ценах 2000 года) при односменной работе участка.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Зависимость массопереноса при ЭИЛ от суммарной величины энергии искровых разрядов, изменяющаяся по экспоненциально-степенному закону.

2. Результаты исследования зависимости массопереноса, формирования ИПС электродными материалами, полученными из вольфрамсодержащего минерального сырья, подтверждающие целесообразность использования данных материалов для повышения эксплуатационных характеристик покрытий.

3. Методика определения технологических параметров при механизированном ЭИЛ с использованием новой высокочастотной установки мод. ИМ101, позволяющая повысить сплошность и равномерность толщины образуемых покрытий.

4. Результаты исследования физико-механических свойств многослойных покрытий в зависимости от электродных материалов, последовательности их применения и энергетических параметров процесса ЭИЛ.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 14 работах и докладывались на: региональной научно-технической конференции по итогам выполнения МРНТП «Дальний Восток России» за 1993-1996 гг. г. Комсомольск-на-Амуре, 1996; межвузовской научной конфе-

ренции "Интеллектуальный потенциал Сибири", г. Новосибирск. 1997; международных симпозиумах «Принципы и процессы создания неорганических материалов», Хабаровск, 1998, 2002.

Структура и объем работы. Диссертационная работа содержит введение, 6 глав, основные результаты и выводы, список литературы и приложение. Общий объем работы составляет 166 страниц, включая 36 рисунков, 21 таблицу и библиографию из 228 наименований.

Автор выражает глубокую благодарность научному консультанту, заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору Верхотурову Анатолию Демьяновичу за оказанную помощь в постановке задач исследования и экспериментов, за консультации при написании и представлении данной работы к защите.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, формулируется цель исследований, излагаются основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу и обобщению теоретических и экспериментальных данных по эрозии материала анода, формированию ИПС и его свойств.

Рассмотрены основные физические модели процесса ЭИЛ, эрозия материалов электродов, физико-химические свойства легированного слоя. Показано, что формирование структуры ИПС при ЭИЛ имеет сложный механизм, включающий одновременное протекание целого ряда явлений: плавление и испарение, перемешивание расплавленного вещества и диффузию, массоперенос и разрушение. На процесс переноса вещества с одного электрода на другой существенное влияние оказывают энергетические и временные параметры разрядов, а также соотношение физико-химических свойств материалов электродов и состояние межэлектродной газовой среды.

Многослойные покрытия методом ЭИЛ создавали в основном для упрочнения режущего и штампового инструмента: двухслойные покрытия твердый сплав+(графит, меднографит, медь, хром), или графит-твердый сплав, чередование твердых сплавов. Кроме упрочнения, второй слой предназначается для уменьшения шероховатости, улучшения теплоотвода, повышения жаростойкости и триботехнических свойств.

Отмечается тенденция к совершенствованию аппаратного обеспечения процесса ЭИЛ, переход от ручного легирования к механизации и автоматизации процесса за счет совершенствования существующих электронных схем генераторов импульсов или создания принципиально новых с целью увеличения производительности и улучшения качественных характеристик образуемых покрытий.

Анализ литературных данных позволил выявить недоработки теоретического, методического и экспериментального характера, сдерживающие широкое внедрение метода электроискрового легирования в производстве: отсутствие единой модели процесса ЭИЛ (физической и математической); низкая воспроизводимость результатов, полученных при использовании установок ЭИЛ разных моделей, поскольку полученные результаты формирования структуры покрытий привязаны к технологическим режимам конкретной установки; отсутствие систематических данных по оптимальным технологическим режимам обработки.

На основании проведенного анализа поставлены соответствующие задачи исследований.

Во второй главе описываются методика, оборудование и материалы, используемые для исследований.

В качестве материалов подложек для исследования процесса массопереноса выбраны сталь 45, ст3, Х12Ф1, имеющие широкое применение в машиностроении. В качестве материалов анода применяли новые сплавы, полученные методом алюминотермии из вольфрамсодержащего минерального сырья ДВ региона (табл.1). и материалы Ti, Cr, Ni, α -Fe, W, ВК8, используемые при сравнении.

Создание перспективных электродных материалов на основе вольфрама, полученного непосредственно из шеелитового концентрата методом алюминотермии, базировалось на следующих положениях:

- повышение эрозии за счет снижения межзеренной прочности сплава при введении легирующих элементов;
- увеличение содержания пластической связки, образующей с материалом катода неограниченные твердые растворы;

- оптимальное процентное содержание легирующих элементов, обеспечивающее инициирование процесса алюминотермии и разделение продуктов на шлаковую и металлическую фазы с максимальным выходом металла.

Таблица 1

Усредненный химический состав электродных материалов,
полученных методом алюминотермии

Электродные материалы	Среднее содержание элементов, мас. %									
	W	Fe	Ni	Co	Mo	Zr	Cr	Al	Si	Оксиды
W-Fe	75,0	21,0	0,3	0,4	0,2	-	-	1,1	1,0	1,0
W-Ni	65,0	1,6	28,0	0,3	0,4	-	-	1,6	1,5	1,6
W-Co	62,0	2,0	0,2	32,0	0,2	-	-	1,2	1,0	1,4
W-Zr	77,5	3,2	6,0	0,3	0,4	5,3	-	2,8	1,6	2,9
W-Cr	77,0	1,6	0,4	0,3	0,3	-	16,0	1,5	1,5	1,4
W-Co-Mo	62,0	2,6	0,2	10,0	20,0	-	0,1	1,8	1,2	2,1
W-Ni-Mo	61,5	2,4	24,0	0,3	6,5	-	-	2,0	1,3	2,0
W-Ni-Zr	61,5	2,3	25,0	0,3	0,2	6,0	0,1	2,0	1,1	1,5
W-Cr-Mo	62,9	1,5	0,3	0,3	12	-	18	1,7	1,4	1,8

В качестве электродного материала при образовании первого слоя многослойных покрытий применялась хромоникелиевая сталь 07X19H11M3Г2Ф, как коррозионностойкий и жаростойкий материал, обеспечивающий наибольшие массоперенос и износостойкость.

Толщину наносимых покрытий измеряли микрометром Mitutoyo, шероховатость поверхности определяли профилографом модели 296, Калибр 201, время измеряли секундомером с точностью 0,2 с.

Микротвердость поверхности определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3, металлографические исследования поверхностных слоев выполняли на микроскопе МИМ-10, сравнительные испытания на износостойкость выполняли в условиях трения без смазки на машине трения МТ-22П по схеме “вал-колодка”.

Исследования на жаростойкость покрытий, образуемых электродными материалами, выполняли на дериватографе Q-1500.

Рентгенофазовый анализ покрытий выполняли с помощью дифрактометра ДРОН-3М. Исследование распределения элементов по толщине образуемых покрытий в поперечном сечении проводили с помощью микроанализатора MAP-3.

При исследовании в атмосфере воздуха использовали установки для электроискрового легирования моделей "Элитрон-22А", и разработанные в институте материаловедения "ИМ-05" и "ИМ101". При механизированном легировании использовали установку ИМ101 в комплексе с токарно-винторезным станком мод.1К62 и одноэлектродной головкой.

Выполнен расчет элементов принципиальной схемы, изготовлен опытный образец, определены электрические и технологические параметры высокочастотного генератора импульсов установки ИМ101 для осуществления механизированного процесса ЭИЛ. Внешний вид установки приведен на рис. 1.



Рис. 1. Внешний вид установки ИМ101

Определение энергетических параметров процесса электроискрового легирования для установок выполняли на специальном стенде, включающем осциллограф мод. С8-17, прибор для определения среднего количества состоявшихся искровых разрядов, цифровой мультиметр М890G для измерения частоты следования искровых разрядов. Значения энергии искрового разряда рассчитывали по вольтамперным осциллограммам.

При исследовании массопереноса изменяемым параметром являлась суммарная величина энергии искровых разрядов Q при легировании подложки площадью 1 см^2 , значение которой определено по средней величине энергии

одного искрового разряда W_u . Численно суммарная величина энергии рассчитывалась:

$$Q = W_u \cdot N_u \cdot t = W_u \cdot (60 f_u \cdot K_u) \cdot t, \quad (1)$$

где W_u - среднее значение энергии одного искрового разряда при исследовании каждого из указанных материалов; N_u - среднее количество искровых разрядов состоявшихся в течение 1 мин; t - время легирования 1 см² поверхности, мин; f_u - частота следования искровых разрядов, Гц; $K_u = N_u/f_u$ - коэффициент, определяющий вероятность прохождения искрового разряда.

Гравиметрическим методом, при использовании весов ВЛР-200, определяли величины удельной эрозии анода Δ^a и удельного привеса катода Δ^k через каждую 1 мин процесса ЭИЛ и по их значениям рассчитывали суммарную эрозию анода $\Sigma\Delta^a$ и суммарный привес катода $\Sigma\Delta^k$; коэффициент переноса материала рассчитывали по формуле $K = \Delta^k/\Delta^a$ при $t = \text{const}$ для каждого электродного материала; графически определяли t_x и Q_x - порог хрупкого разрушения измененного поверхностного слоя (ИПС) – соответственно время и суммарную энергию искровых разрядов, которым соответствует первое отрицательное значение Δ^k или максимальное значение $\Sigma\Delta^k$. Эффективность процесса образования ИПС рассчитывали

$$\gamma_{t_x} = K \cdot t_x \cdot \sum \Delta_{t_x}^k, \quad (2)$$

где \bar{K} - усредненный коэффициент переноса материала за период времени t_x ; $\sum \Delta_{t_x}^k$ - суммарный привес катода за время t_x .

В третьей главе выполнено исследование зависимости массопереноса, формирования легированного слоя и его свойств при ЭИЛ вольфрамсодержащими электродными материалами от энергетических параметров. Установлено, что при упрочнении материалами, полученными из минерального сырья, легирующие элементы которых образуют с железом неограниченные твердые растворы (Ni, Cr), значения порога хрупкого разрушения значительно больше, чем при упрочнении материалами, легирующие элементы в которых образуют с железом ограниченные твердые растворы (Zr).

Результаты исследования микроструктуры, микротвердости, шероховатости и сравнительных испытаний на износостойкость, фазовый состав и средние данные по сплошности формируемых ИПС при ЭИЛ компактными элект-

тродами приведены в табл. 2. Микроструктура покрытий, лучших по этим характеристикам приведена на рис. 2.

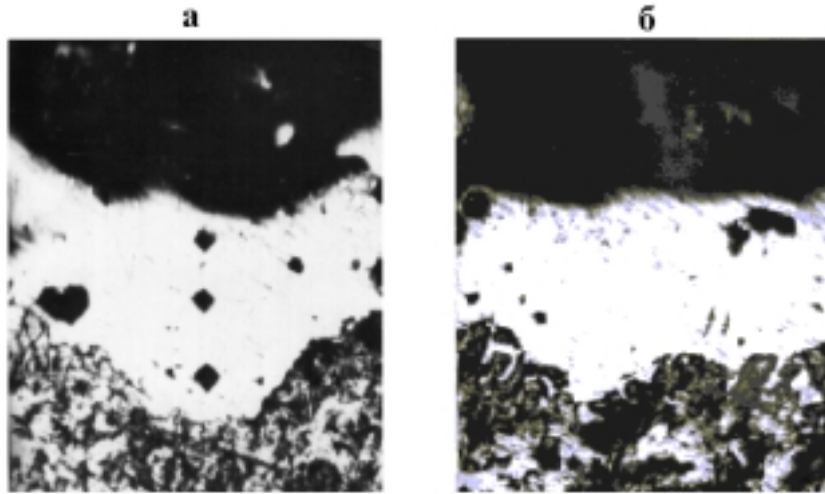


Рис. 2. Микроструктура покрытий ЭИЛ электродными материалами:
а — W-Ni; б — W-Cr (x260)

Анализ полученных данных показывает, что при применении новых материалов толщина образуемых покрытий значительно увеличивается (с 50 до 140 мкм) при одновременном относительно небольшом увеличении шероховатости поверхности (с $R_a=6,6$ мкм до $R_a=7,6$ мкм). Все покрытия обеспечивают повышение износостойкости от 1,8 (BK8) до 3,8 (W-Cr) раз. Для повышения жаростойкости эффективно использовать материалы: W-Cr, W-Ni, W-Ni-Zr.

В четвертой главе для механизированного ЭИЛ с учетом контактного взаимодействия электродов и равномерности расположения электроискровых лунок разработана методика определения технологических параметров, применение которой позволяет формировать покрытия с большей толщиной, меньшей шероховатостью и высокой сплошностью.

Частота следования искровых разрядов с учетом равномерности расположения электроискровых лунок определяется:

$$f_n = \frac{n_d \pi d}{60 S}, \quad (3)$$

где n_d - частота вращения детали - шпинделя станка, мин^{-1} ; S - подача на оборот шпинделя, мм; d - диаметр детали, мм.

Таблица 2

Характеристики образуемых покрытий

Материал электродов	Толщина на покрытие, мкм	Микротвердость покрытия, H_{μ}^{50} , ГПа	Толщина переходной зоны, мкм	Шероховатость R_a , мкм	Средний коэффициент переноса материала, \bar{K}	Фазовый состав	Сплошность, K_s в %	Повышение износостойкости, раз	Повышение жаростойкости, раз при $t=800^{\circ}\text{C}$, на подложках:	
									Ст3	X12Ф1
W-Fe	20-100	7,1-8,6	15-28	3,9-7,6	0,75	W, WC, α -Fe, FeO	87	2,0-2,4	1,02	0,48
W-Ni	25-140	6,9-8,3	15-35	3,8-7,2	0,81	W, Ni, FeNi, WC, α -Fe, FeO, Ам.ф.	94	2,2-3,5	7,79	1,31
W-Co	20-80	7,7-9,2	12-27	3,6-7,1	0,80	W, Co, Co_4W_6 , α -Fe, FeO	88	2,2-3,4	2,33	1,94
W-Zr	20-60	9,7-11,8	12-27	3,2-7,0	0,68	W, WC, ZrW ₂ , ZrO ₂ , α -Fe	81	1,8-2,3	6,3	1,94
W-Cr	15-110	9,6-10,1	14-34	2,8-6,9	0,76	FeCr, W, Cr, Cr ₃ C, FeO, α -Fe, Ам.ф.	93	2,5-3,8	4,83	1,88
W-Co-Mo	18-86	7,4-9,0	16-30	3,7-7,2	0,74	WMo, Fe ₂ W, W, Fe ₂ WO ₆ , FeO	84	2,1-3,2	2,12	1,82
W-Ni-Mo	20-115	6,8-8,5	14-36	3,9-7,3	0,77	W, Ni, FeNi, Fe ₃ W, Fe ₃ Mo, Ам.ф.	88	2,3-3,3	4,35	1,96
W-Ni-Zr	20-96	7,6-9,8	13-25	3,5-7,1	0,75	W, Ni, Zr, WC, ZrO ₂ , α -Fe, Ам.ф.	85	2,3-3,3	5,42	1,67
W-Cr-Mo	19-88	9,5-10,0	12-28	2,8-7,0	0,73	W, Cr, Fe ₂ W, Fe ₃ Mo, FeCrMo, Ам.ф.	92	2,4-3,7	4,33	1,62
БК8	15-50	9,8-10,5	13-26	2,8-6,6	0,56	WC, W ₂ C, Fe ₂ W, FeC	86	1,8-2,5	4,5	1,7

Количество вещества, перенесенного на катод, определяется, в основном, энергетическими параметрами электроискрового воздействия и материалом анода. С повышением частоты следования искровых разрядов и энергии единичного разряда, увеличивается удельная энергия Q , рассчитанная по формуле (1) и соответственно массоперенос.

При механизированном ЭИЛ применение электродного материала 07X19H11M3Г2Ф, содержащего элементы, образующих неограниченные твердые растворы с железом, обеспечивает формирование покрытий с высокой сплошностью, равномерностью и толщиной, превышающей в 2,7-3,2 раза, чем при применении материалов электродов из ВК8 и Cu, а лучшие триботехнические характеристики в условиях трения без смазки для исследуемых материалов электродов соответствуют величине энергии $Q = 10 \text{ кДж/см}^2$.

Сравнение ручного и механизированного процессов ЭИЛ с использованием электродного материала 07X19H11M3Г2Ф (табл.3) подтверждает преимущества в использовании механизированного процесса ЭИЛ.

Таблица 3

Характеристики ИПС при ручном и механизированном ЭИЛ стали 45 на установке мод. ИМ101 электродами из стали 07X19H11M3Г2Ф

Вид ЭИЛ	Режимы		Сплошность, %	Толщина ИПС Δh , мкм	Микротвердость, H_{μ}^{50} , ГПа	Шероховатость, Ra, мкм	Средний коэффициент переноса, \bar{K}
	$f_{из}$, Гц	C, мкф					
Ручной	100	300	83	184-328 (ср. 256)	4,3-5,6	4,2-7,1	0,80
	300	100	92	119-165 (ср. 142)	4,6-5,7	3,8-6,4	0,77
Механизированный	100	300	93	232-254 (ср. 243)	5,1-5,6	3,6-4,1	0,85
	300	100	100	125-153 (ср.139)	5,3-5,8	3,2-3,5	0,79

В пятой главе выполнено исследование закономерности массопереноса в зависимости от суммарной величины энергии искровых разрядов:

$$\Sigma \Delta^k = A \cdot Q^b \cdot \exp(cQ); \quad (4)$$

$$\ln \Sigma \Delta^k = \ln A + cQ + b \ln Q, \quad (5)$$

где A , b , c - коэффициенты уравнения, определяемые экспериментально.

По уравнениям построены графики зависимости суммарного привеса катода, скорости его изменения и составляющих логарифмического уравнения (5) массопереноса от суммарной величины энергии искровых разрядов для каждого из материалов электродов. На рис. 3. приведен наиболее общий их вид.

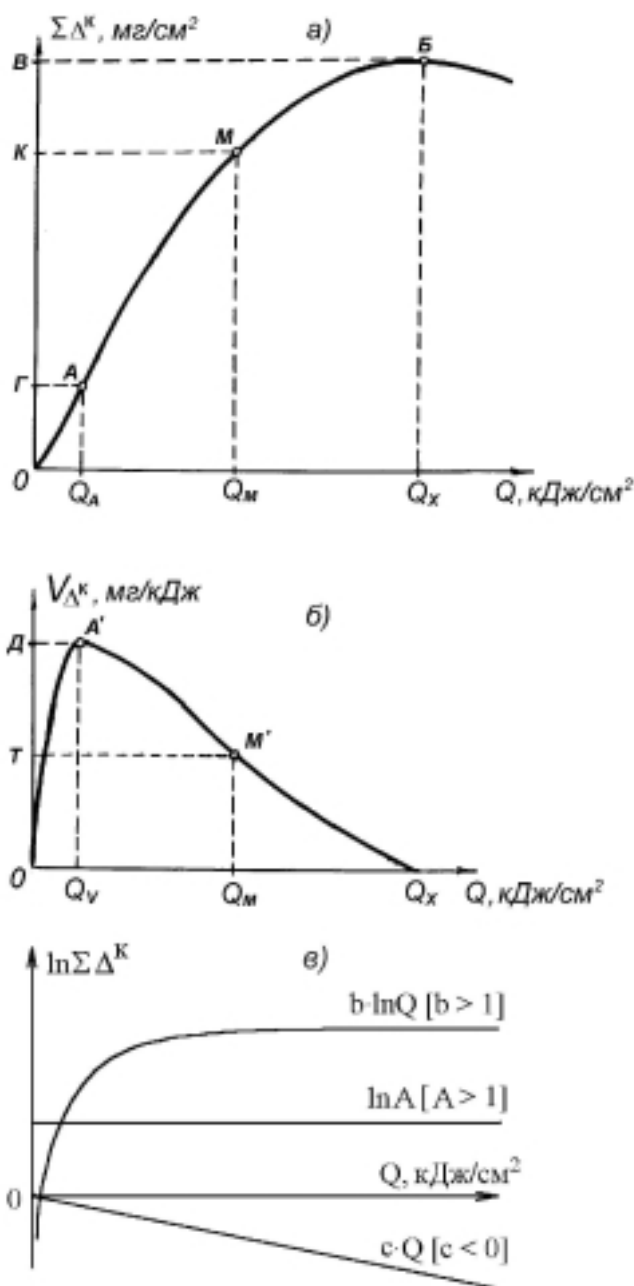


Рис. 3. Зависимости изменения массы катода (а), скорости ее изменения (б) и составляющих логарифмического уравнения (4) массопереноса (в) от суммарной величины энергии искровых разрядов

Анализ уравнения (5) позволяет выделить слагаемое $\ln A$, которое определяет постоянный вклад в массоперенос и формирование на катоде покрытия в зависимости от природы электродных материалов (соотношения их теплофизических характеристик) и постоянно действующих явлений (асимметричное тепловыделение в металлических контактах, эффект полярности и др.);

Скорость изменения массы катода от суммарной величины энергии искровых разрядов (рис.3, б) неравномерна. Сначала скорость изменения увеличивается, затем, начиная со значения $Q > Q_v$ уменьшается, что можно объяснить влиянием образуемых гетерогенных поверхностных слоев на электродах и свидетельствует об уменьшении эффективности затрат энергии при увеличении массы (толщины) ИПС. Значения параметров, используемых для оценки формирования ИПС на подложках из стали 45 материалами электродов, приведены в табл. 4.

Численные значения отношений: $\Sigma \Delta_x^k / Q_x$ и $Q_x / \Sigma \Delta_x^k$, определяют соответственно среднее увеличение массы катода на единицу суммарной величины энергии искровых разрядов (кДж) и средние затраты энергии искровых разрядов на единицу увеличения массы катода (мГ). Первое значение характеризует эффективность затрачиваемой энергии (производительность), второе значение определяет расход энергии (себестоимость) на введение единицы легирующих элементов в состав ИПС. Целесообразность прекращения процесса ЭИЛ (точка М на рис.3, а,б) с учетом этих двух параметров может быть рекомендовано при значении энергии $Q_m = (0,5-0,7)Q_x$.

Анализ адекватности полученной закономерности позволяет рекомендовать наравне с критерием преимущественного массопереноса материала анода на катод D_m , предложенного Верхотуровым А. Д., параметр А из уравнения (4), в качестве критерия выбора материала легирующего электрода. Корреляция этих двух параметров получилась следующая: $r(D_m, A) = 0,999$.

В шестой главе разработаны рекомендации по выбору комплексных составов электродных материалов и их чередованию, результатом которого стала разработанная структурная схема процесса ЭИЛ при формировании многослойных покрытий, приведенная на рис. 4.

В исходном состоянии материал катода (деталь) обладает определенными физико-химическими параметрами, которые в процессе выполнения

Таблица 4

Численные значения параметров, используемых для оценки формирования ИПС на подложках из стали 45

Наименование параметров	Материал анода																				
	W-Fe	W-Ni	W-Co	W-Cr	W-Zr	W-Cr	W-Co-Mo	W-Ni-Mo	W-Ni-Zr	W-Ni-Mo	W-Ni-Zr	W-Cr-Mo	W-Cr-Mo	07X19H11M3Г2Ф	α-Fe	Cr	Ni	W	Ti	ВК8	
														f _к =100	f _к =300						
$\gamma_{тх}$ [см. мин]	0,07	8,05	5,47	2,81	2,81	6,11	5,44	6,93	4,93	4,93	5,56	18,41	28,23	5,28	8,10	9,41	3,22	2,31	1,78		
Q_x [кДж/см ²]	16,2	15,8	17,0	13,9	13,9	14,8	16,2	17,3	14,7	14,7	30,9	58,6	81,7	18,1	27,8	30,6	12,4	13,0	12,28		
A	1,51	1,56	1,22	1,08	1,08	1,59	1,22	1,62	1,36	1,36	1,62	1,70	2,59	1,74	1,65	1,59	1,13	1,15	1,11		
$\sum \Delta_k^x / Q_x$ [мг/кДж]	0,98	1,27	0,78	0,77	0,77	1,31	0,88	1,29	0,99	0,99	1,34	1,24	1,51	1,15	0,96	1,03	0,41	0,52	0,76		
$Q_x / \sum \Delta_k^x$ [кДж/мг]	1,02	0,79	1,29	1,31	1,31	0,76	1,13	0,78	1,01	1,01	0,75	0,80	0,66	0,87	1,04	0,97	2,46	1,92	1,31		
Толщина ИПС Δh, мкм	100	120	80	60	60	140	80	145	90	90	160	320	480	80	90	100	45	20	60		
Микро- твердость, ГПа	8,6	8,3	8,8	11,8	11,8	10,1	9,0	8,5	9,2	9,2	9,6	5,9	5,8	3,3	11,2	4,3	8,9	6,8	10,5		
Повыше- ние изно- стойко- сти пок- рытия в %	200	270	240	200	200	310	260	280	270	270	310	160	140	110	180	95	170	130	220		

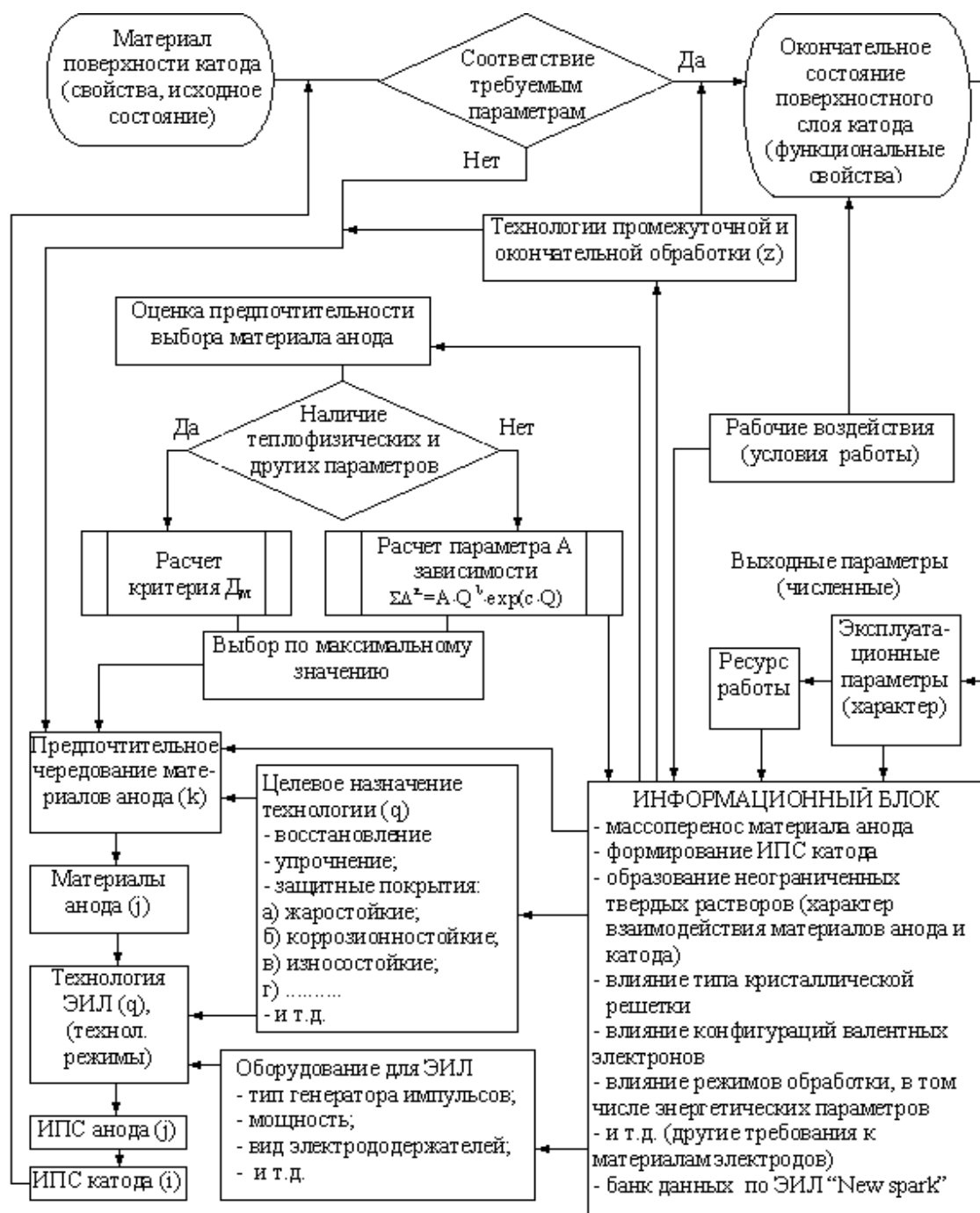


Рис. 4. Структурная схема процесса образования многослойных покрытий методом ЭИЛ

"i" операции обработки будут изменяться. Последнее состояние поверхности под влиянием воздействий должно обеспечивать заданные эксплуатационные параметры и необходимый ресурс работы. Для каждого варианта ИПС необходимо применять технологический процесс ЭИЛ, соответствующий выбранному материалу анода "j", на поверхности которого под воздействием процесса ЭИЛ также образуется вторичная структура. Вариант "q" целевого назначения тех-

нологии ЭИЛ взаимосвязан с информационным блоком предпочтительного взаимодействия материалов электродов "к" и технологическими режимами. Технологические режимы и оборудование определяются по известным данным блока для монопокрытий с учетом целевого назначения технологии.

Структурной схемой предусмотрено применение дополнительных промежуточных технологий "z" обработки ИПС, а так же отделочной обработки перед установкой детали в рабочее положение.

Сформулированы требования, предъявляемые к электродам при формировании первого слоя (а также последующих слоев) и требования, предъявляемые к электродам при окончательном формировании многослойного покрытия, приведенные на рис. 5

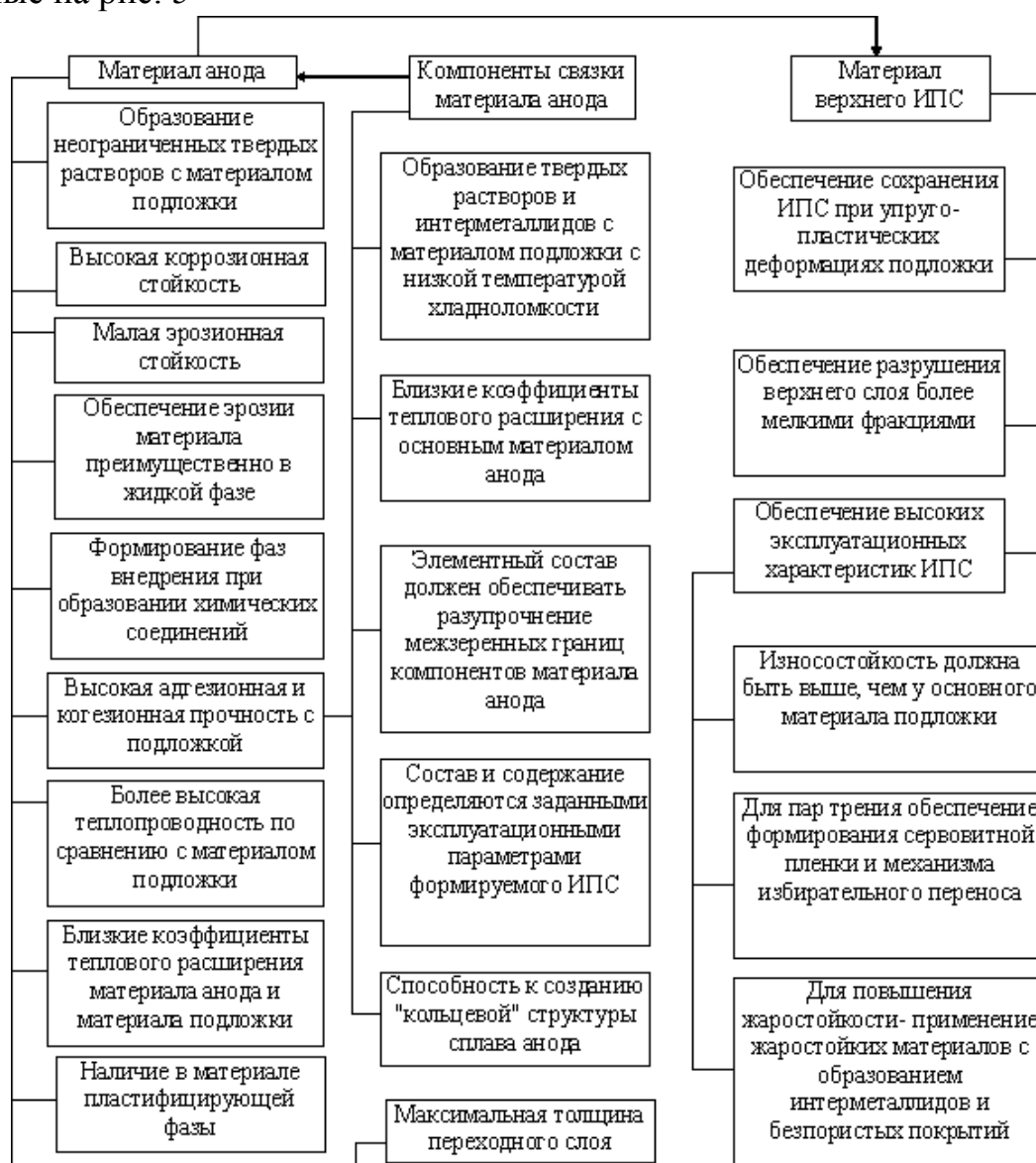


Рис. 5. Требования к материалам электродов при формировании моно- и многослойных покрытий методом ЭИЛ

Проведено исследование массопереноса материала анода на катод при формировании многослойных покрытий с применением материалов 07X19H11M3Г2Ф, (W-Cr), (W-Ni), ВК8 и др. Характеристики образованных покрытий приведены в табл. 5.

Таблица 5.

Характеристика сформированных многослойных покрытий на подложках из стали 45

Электродные материалы, использованные для формирования покрытия	Средняя толщина ИПС, Δh, мкм	Средние значения микро-твер-дости, Н _ц ⁵⁰ , ГПа	Q _x последнего слоя, КДж/см ²	Повышение износостойкости, раз
<u>Двухслойные покрытия</u>				
07X19H11M3Г2Ф + (W-Cr)	240	9,8	16,10	1,9
07X19H11M3Г2Ф + (W-Ni)	230	8,1	14,57	1,6
07X19H11M3Г2Ф + (W-Cr-Mo)	200	9,1	15,33	1,7
07X19H11M3Г2Ф + ВК8	150	10,4	11,24	1,8
<u>Трехслойные покрытия</u>				
07X19H11M3Г2Ф + (W-Cr) + Cr	300	8,1	14,16	2,1
07X19H11M3Г2Ф + (W-Cr) + ВК8	250	10,5	11,13	1,9
07X19H11M3Г2Ф + ВК8 + Cr	250	9,3	14,82	2,4
07X19H11M3Г2Ф +Т15К6+Cr	180	10,6	14,2	1,9
07X19H11M3Г2Ф + (W-Cr)+Т15К6	200	12,6	11,1	1,9
07X19H11M3Г2Ф +(W-Cr-Mo)+ВК8	210	10,8	11,3	1,7

На основе принятой графической закономерности, приведенной на рис. 3, а разработана схема процесса ЭИЛ при формировании многослойных покрытий. Критерий выбора последовательности применения электродных материалов при образовании многослойных покрытий толщиной более 200 мкм с учетом параметра $A_1 - A^1 > A^2$. Схема разработки маршрута процесса ЭИЛ при формировании трехслойного покрытия приведена на рис. 6. Индексы у буквенных обозначений указывают этапы (последовательность) использования материалов анода.

Приведены рекомендации и разработаны технологии восстановления и упрочнения поверхностей ряда деталей методом ЭИЛ. Для восстановления изношенных поверхностей использовали электроды из стали 07X19H11M3Г2Ф и новых материалов W-Ni, W-Cr, W-Cr-Mo.

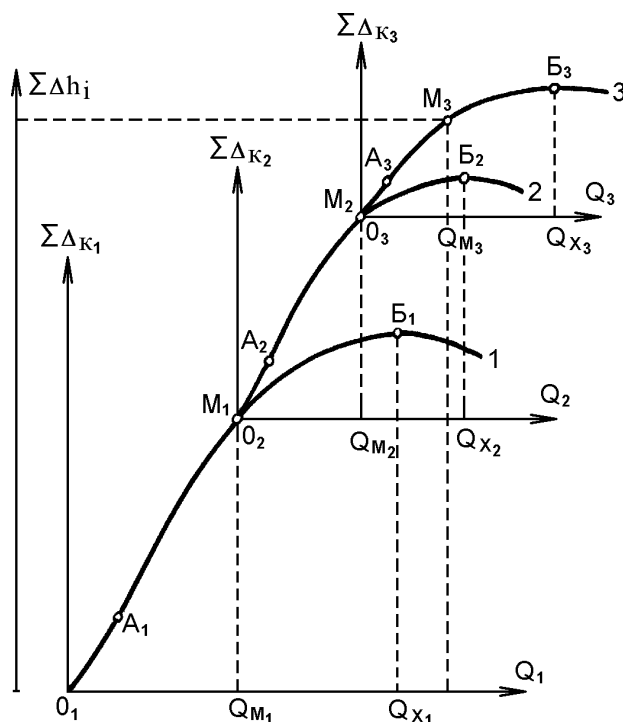


Рис. 6. Схема разработки маршрута процесса ЭИЛ при формировании трехслойного покрытия

Основные выводы

1. Подтверждено, что формирование покрытия методом ЭИЛ зависит от энергетических и технологических параметров процесса. Полученная экспоненциально-степенная зависимость позволяет установить границы окончания процесса формирования ИПС с определением параметров ЭИЛ для используемых электродных материалов и обеспечением воспроизводимости результатов.

2. Оценка предпочтительности выбора материалов электродов может выполняться по параметру A закономерности массопереноса, определяемого экспериментально. Для оценки эффективности затрачиваемой энергии и себестоимости процесса ЭИЛ предложены отношения $\Sigma \Delta_{\text{х}}^{\text{к}} / Q_{\text{х}}$ и $Q_{\text{х}} / \Sigma \Delta_{\text{х}}^{\text{к}}$, характеризующие эти значения.

3. Исследован процесс формирования легированного слоя и его свойств при использовании новых электродных материалов из минерального сырья. Показатели массопереноса, сплошности, толщины покрытий во многих случаях превосходят аналогичные показатели для покрытий, получаемых с использованием сплава ВК8.

4. Установленная взаимосвязь механических и энергетических параметров процесса при механизированном ЭИЛ с применением новой высокочастотной установки ЭИЛ мод. ИМ101 позволяет расширить технологические области процесса в повышении качества и эксплуатационных характеристик.

5. Принятые закономерность формирования ИПС и структурная схема процесса образования многослойных покрытий позволяют обоснованно выполнять разработку маршрута процесса ЭИЛ для многослойных покрытий с определением всех технологических параметров для используемых электродных материалов и вариантов промежуточной обработки.

6. Технологические процессы с применением новых материалов и оборудования ЭИЛ обеспечивают повышение долговечности работы металлорежущих инструментов в 2-3 раза, увеличение срока службы изношенных деталей за счет восстановления и упрочнения их рабочих поверхностей в среднем на 50 %. (Имеются акты внедрения)

Основное содержание диссертации опубликовано в работах

1. Верхотуров А. Д., Мулин Ю. И., Метлицкая Л. П., Ярков Д. В. и др. Использование минерального сырья Дальневосточного региона для образования износостойких и жаростойких покрытий методом электроискрового легирования // Создание материалов и покрытий при комплексном использовании минерального сырья. Сб. научных работ ИМ ДВО РАН. Владивосток, 1998. С.118-122

2. Мулин Ю. И., Гостищев В. В., Ярков Д. В. и др. Энергосберегающая технология переработки вольфрамового концентрата в электродные материалы // Техника и технология разработки месторождений полезных ископаемых. Международный научно-технический сборник. Сиб. ГИУ, РАЕН Новокузнецк, 1998. С.31-37

3. Верхотуров А. Д., Мулин Ю. И., Ярков Д. В. и др. Защитные покрытия, образуемые при электроискровом легировании новыми электродными материалами на основе вольфрама, полученного непосредственно из минерального сырья // Перспективные материалы. 1999. №1. С.70-79.

4. Мулин Ю. И., Верхотуров А. Д., Ярков Д. В. Поверхностное упрочнение сталей электроискровым легированием электродами из минерального сырья //

Сборник научных трудов института машиностроения и металлургии ДВО РАН. Владивосток; Дальнаука, 1997. С. 209-214.

5. Мулин Ю. И., Климова Л. А., Ярков Д. В. Модель формирования поверхностного слоя методом электроискрового легирования: разработка и исследование // Вестник Амурского государственного университета. Вып. 6, Благовещенск; Изд. АмГУ, 1999. С. 27-31.

6. Масленко А. С., Ярков Д. В., Мулин Ю. И. Исследование кинетики процесса массопереноса при использовании механизированной установки для ЭИЛ // Вестник Амурского государственного университета. Вып. 9, Благовещенск; Изд. АмГУ, 2000. С. 18-19.

7. 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.

8. Ярков Д. В., Мулин Ю. И. Формирование многослойных покрытий методом электроискрового легирования // Исследования Института материаловедения в области создания материалов и покрытий. Владивосток: Дальнаука, 2001. С.223-228.

9. Патент № 2162488 Россия 7С23. Способ восстановления деталей / Мулин Ю. И., Вишневецкий А. Н., Христюк В. Д., Лысич А. М., Ярков Д. В. Оpubл. 27.01.2001 Бюл. № 3.

ЯРКОВ ДМИТРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЭИЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.
Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2004 – 23с.

Подписано к печати 21.04.2004. Формат 60x81/16.
Бумага писчая. Гарнитура «Таймс». Офсетная печать.
Усл.- печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ 127

Издательство Хабаровского государственного технического университета
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136