

О методологии упрочнения и восстановления исполнительных поверхностей деталей машин, повышении эффективности и критериях оценки при ЭИЛ.

Часть 1. Методология исследований и получения ЭИЛ-покрытий

* В. И. Иванов^{a,b}, А. Д. Верхотуров^c, ** Л. А. Коневцов^d

^aФедеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,
г. Москва, 109428, Россия

^bИнститут механики и энергетики Национального исследовательского
Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева,
г. Саранск, 430005, Республика Мордовия, Россия
*e-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

^cФедеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения РАН,
г. Хабаровск, 680063, Россия

^dФедеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт материаловедения Хабаровского научного центра Дальневосточного отделения РАН,
г. Хабаровск, 680042, Россия
**e-mail: konevts@yandex.ru

Рассмотрен ряд методологических схем, связанных с получением функциональных ЭИЛ-покрытий. Разработаны основные методологические положения упрочнения и восстановления исполнительных поверхностей различных объектов из токопроводящих материалов методом ЭИЛ с учетом их функционального назначения и показана важная роль материала анода во взаимосвязи с материалом катода в процессе создания покрытий.

Ключевые слова: электроискровое легирование, методология, функциональные свойства, деталь, исполнительная поверхность, технология, анод, катод.

УДК 621.9.048

DOI: 10.5281/zenodo.1297921

ВВЕДЕНИЕ

Современное машиностроительное производство основано на использовании различных методов обработки материалов (механическая, термическая, электрофизическая, электрохимическая и др.) и их сочетаний. Это позволяет получать из исходных заготовок изделия требуемых формы и размеров с необходимыми объемными и поверхностными свойствами, рельефом поверхности. При этом в литературе отсутствуют систематические сведения о методологии достижения востребованных функциональных свойств исполнительных поверхностей (ИП) деталей широкой номенклатуры и различного назначения, используемых в технике, а также инструментов и технологической оснастки для их изготовления. Такая методология должна составлять основу для выбора методов обработки, назначения необходимого оборудования, технологических режимов и пр. с целью достижения нужных свойств поверхностного слоя.

Среди многих способов электрофизической обработки особое место занимает электроискро-

вое легирование (ЭИЛ), способ, запатентованный советскими учеными, супругами Б.Р. и Н.И. Лазаренко в 1943 г. (авторское свидетельство от 03.04.1943 г. № 70010). Более чем за 75-летний период накоплен большой практический и теоретический опыт его применения, во многих технически развитых странах продолжают его исследования в направлении совершенствования оборудования, технологий и электродных материалов [1–10]. Наряду с этим отсутствие систематических сведений о методологии применения ЭИЛ и общепринятых критериев повышения эффективности упрочнения и восстановления ИП с его использованием затрудняет разработку эффективных ЭИЛ-технологий, оценку оптимальных областей его применения. В сравнении с другими метод ЭИЛ относится к наукоемким [11], способствующим также сокращению экологических проблем. Поэтому он является современным и перспективным, составляющим одно из многих звеньев нового этапа в науке о материалах – материаловедении, находящейся в стадии становле-

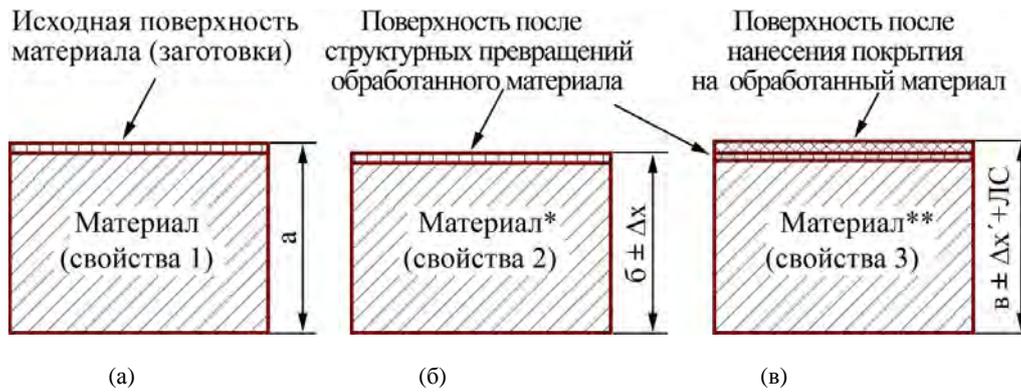


Рис. 1. Схема материала: (а) – до формирования на нем измененного поверхностного слоя – базовый материал (заготовка); (б) – в результате структурных, фазовых превращений материала, $b \pm \Delta x$ – изменение размера материала за счет химико-термической обработки или пластического деформирования; (в) – при использовании методов нанесения покрытий, в том числе создании легированного слоя (ЛС), $v \pm \Delta x + ЛС$.

ния и развития. С позиций материаловедения к наукоемким технологиям относятся те, которые сопутствуют равновесному, устойчивому развитию человечества, а неприемлемыми считаются значительно повышающие энтропию биосферы и не отвечающие новому вектору науки [12–16]. В работах [17–25] показано формирование материаловедения и составляющих ее разделов, одним из которых является материаловедение поверхности*. В частности, материаловедение поверхности изучает создание поверхностного слоя вещества (базового материала или его покрытия): состав, структуру, технологию формирования с целью достижения требуемых свойств и их использования (рис. 1).

Дальнейшее развитие метода ЭИЛ в современных условиях (в спектре нового этапа развития науки о материалах) может способствовать ускоренной разработке его методологических основ [26–29] и эффективному применению, обоснованному подходу к выбору режимов обработки, материалов катода, анода, межэлектродных сред.

Цель данной работы – разработка методологии создания ИП деталей различного назначения путем применения метода ЭИЛ и обоснование критериев и параметров оценки эффективности этого метода. Учитывая значимость философии в науке, в основе создания методологии использовали дедуктивный метод с постепенной уровневой конкретизацией и дополнением разрабатываемой тематики. Методологическую схему создания ИП строили на базе концептуальной основы нового этапа развития науки о материалах – материаловедения, фундаментальной основой которой является парадигма материаловедения. Она представляет собой дальнейшее развитие 4-звенной парадигмы Г.В. Самсонова: «состав → технология → структура → свойства», дополненной признаком функционального назначения (ФН) материала и расширенными признаками состава

и технологии [16, 21–23, 27–29]. Для разработки методологии создания ИП деталей методом ЭИЛ использовали гипотетико-дедуктивную модель получения научного знания, верхними уровнями которой являются предельно допустимые и общенаучные методы, определяющие методологию наук о материалах – материаловедению [26–29].

РАЗРАБОТКИ И ОБСУЖДЕНИЕ

Методология исследований упрочнения и восстановления деталей методом ЭИЛ

Методология разработки методов и технологий упрочнения и восстановления деталей неразрывно связана с общенаучной методологией. Она имеет многоуровневый характер и построена на принципах дополнения и конкретизации общей методологии (рис. 2).



Рис. 2. Методологическая схема уровней разработки методов и технологий упрочнения и восстановления деталей (ЭЭМ – энтропийно-экологический раздел материаловедения).

Методологий промежуточных уровней от методологии материаловедения до методологии ЭИЛ в литературе нет. Поэтому методология ЭИЛ может быть разработана, исходя из методологии материаловедения, на основании сформулированных целей и задач науки о материалах, ее предмета исследований и концептуальных основ [18]. В табл. 1 приведены результаты анализа мето-

* Под поверхностью условно принимается слой видимой поверхности, подповерхностный и приповерхностный, величина которого определяется измененными (в отличие от основы) составом и структурой в результате различного рода граничных воздействий.

Таблица 1. Цели, задачи, предмет исследований материаловедения и ЭИЛ

Элементы методологии	Материаловедение	ЭИЛ
Цель	Разработка и получение материалов с требуемыми свойствами в условиях устойчивого развития человечества.	Разработка и получение легированного слоя (ЛС) с высоким уровнем свойств и высокой эффективностью процесса ЭИЛ.
Задача	Исследование и получение информации, знаний о взаимосвязи «ФН – состав – технология – структура – свойства» с учетом циклического круговорота вещества и материалов во «второй» природе.	Исследование взаимосвязи «состав – технология – структура – свойства» материалов анода и катода для создания ЛС с требуемыми свойствами.
Предмет исследований	Материалы: химические элементы, сплавы на их основе, другие соединения, в том числе из нетрадиционных источников сырья.	Токопроводящие материалы (металлы и их сплавы), ЛС и его свойства.



Рис. 3. Методологическая схема упрочнения и восстановления ИП деталей методом ЭИЛ (шестого уровня).

логии материаловедения и ЭИЛ из сопоставления целей, задач и предмета исследований.

В связи с отсутствием в литературе уровневой классификации методов и процессов необходимо допустить ограничения, так как ни методология получения поверхности материала с заданным качеством, ни методология электрофизических методов и ЭИЛ пока не созданы. В связи с этим сделано допущение, что методология ЭИЛ может быть разработана, исходя из методологии материаловедения. Нами была разработана методология материаловедения на основании сформулированных целей науки о материалах, ее задач, предмета исследований и концептуальных основ [26–29]. На ее основе, используя принцип «дополнения и конкретизации», разработана методологическая схема создания ИП деталей (рис. 3) по мере снижения до рассматриваемого уровня с формированием функционального ЛС. Для разработки методологических основ создания ИП деталей с использованием метода ЭИЛ предложено базироваться на концептуальной основе науки о материалах, в основу которой положена четырехзвенная парадигма Г.В. Самсонова. Эта парадигма является общепризнанной концептуальной основой материаловедения, однако она не включает в себя признак, определяющий создание функциональных материалов, то есть признак ФН – функционального назначения ИП, кроме того, она не в полной мере

отражает применение разнообразных исходных материалов (например, нетрадиционного для материаловедения исходного сырья: минерального, растительного, производственных отходов и др., которое может быть использовано при ЭИЛ) и не учитывает использование современных (не повышающих значительно энтропию биосферы, таких как ЭИЛ) технологий. Уточнение и глубокое изучение этого признака ФН приводят к обоснованию требований по составу, структуре, свойствам анодного материала. Одними из главных факторов, определяющих выбор материала анода, являются изучение ФН материала катода и имеющаяся база данных модельных исследований анодных материалов (рис. 3).

Обоснование выбора анодных материалов является основой для осуществления типовой технологии «ЭИЛ-1», отработки с ее использованием режимов упрочнения ИП, получение ЛС и выполнение предварительных исследований ЛС (1*, рис. 3) по составу, структуре и свойствам. После предварительных исследований возможна формулировка уточнений ФН по технологии, первых выводов и корректировка режимов. Откорректированный вариант технологии «ЭИЛ-2» в свою очередь требует применения уточненных технологических режимов, в том числе и финишной обработки (также при осуществлении операций упрочнения, реновации

ИП деталей). После выполнения окончательных исследований (2*) получаемого ЛС (состав, структура, свойства), в частности после выполнения финишной обработки ЛС, ИП детали должна отвечать в полной мере своему ФН. При повышенных требованиях к качеству возможен дополнительный этап «ЭИЛ-3». Таким образом, признак ФН является при достижении качества ЛС исходным, и ему подчиняются технологические связи, формирующие требуемые состав, структуру, свойства ИП детали.

В связи с этим в работе используется парадигма материаловедения, сформулированная на базе парадигмы Г.В. Самсонова, дополненная указанным признаком ФН и известная из работ [17, 20, 30]. Она является базой разработки парадигмы материаловедения и методологии формирования ИП деталей методом ЭИЛ и их исследования с использованием критериев эффективности (рис. 4).



Рис. 4. Базовая схема разработки методологии исследования процесса создания ИП деталей методом ЭИЛ.

Более того, предлагается считать все материалы, как созданные природой, так и искусственные, функциональными, предназначенными для участия в тех или иных процессах, содержащих признак ФН материала. Даже случайно созданный путем алхимии материал становится функциональным после познания и уяснения его свойств, предопределяющих функциональное назначение изготовленной из него вещи. Отсутствие признака ФН материала свидетельствует о недостаточно глубоком изучении самого материала и его свойств.

Выбор метода повышения работоспособности ИП деталей

Защитные функциональные покрытия ИП на деталях машин и инструментах должны разрабатываться с учетом условий эксплуатации. При этом надо учитывать обеспечение требования не только получения новых свойств материала, но и управления технологическим процессом его создания. Обоснование выбора технологического процесса повышения работоспособности материала ИП деталей может быть обусловлено выбором директивного либо стратегического направления (рис. 5).

Директивное направление основано на создании условий устойчивого развития страны, решениях правительства с учетом вопросов ресурсообеспечения, импортозамещения, экологии и др. Оно реализуется через разработку и утверждение перечня критических технологий, приоритетных направлений развития науки и страны, перспективных планов РАН, другие разработки. Стратегическое направление обосновано непосредственно необходимостью упрочнения и восстановления деталей, дефицитом различной (например, сельскохозяйственной) техники, продукции в стране, непрерывным ростом потребления машин и энергозатрат отраслями производства. При этом мотивацией выбора направления является необходимость упрочнения и восстановления ИП различных деталей машин, определяемая их ФН.

В настоящее время существуют три пути повышения работоспособности материала деталей. Во-первых, это *получение новых материалов*, связанные с этим пополнение научного банка данных и совершенствование технологий создания материалов и изделий известными методами. Сюда относится получение аморфных, керамических, кристаллических, композиционных материалов. Этот банк пополняется новыми сведениями об исследовании соединений боридов, карбидов, нитридов, тугоплавких соединений. Здесь же рассматривается получение материалов с использованием наноматериалов, а также новых принципов материаловедения с применением нетрадиционного для материаловедения исходного сырья. Во-вторых, это методы *объемного упрочнения* материалов с использованием экстремальных давлений, нагрева и охлаждения. Наряду с этим в последние годы наибольший эффект на практике дает *поверхностное упрочнение*, конструирование и применение слоистых покрытий ИП (одно- или многослойных) материалов методами физического (ФОП), химического (ХОП) осаждения покрытий, лазерного оплавления и осаждения, комбинированными методами. Особое место при этом занимает наукоемкий «русский метод» [31–33] Б.Р. Лазаренко – ЭИЛ, отличающийся высокой универсальностью, технологичностью и экономичностью.

Для реализации повышенных технических требований при создании ИП деталей с применением метода ЭИЛ должны учитываться до начала формирования покрытия химический состав и структурное состояние электродных материалов (катод, анод). Но также необходимо учитывать электрофизические и металлургические процессы в ходе его осуществления, особенности взаимодействия вступающих в связи материалов в процессе формирования ЛС, его



Рис. 5. Обоснование выбора метода повышения работоспособности ИП деталей.

свойства и характеристики поверхности при доводке ИП с целью достижения заданных свойств. При этом следует отметить особую роль слоистых покрытий в конструировании градиентного материала деталей, обладающих в области передачи механического воздействия переменными свойствами по твердости, пластичности, модулю упругости.

При осознании приоритета деятельности человека в производстве материальных благ в интересах страны необходимо государственное стимулирование данного направления (рис. 5). Это касается в значительной мере приоритетного финансирования науки о материалах и машиностроения, определяющих развитие всех других отраслей производства. В настоящее время указанное реализуется в виде постоянных программ, конкурсов, научно-исследовательских работ, грантов, что является, по нашему мнению, явно недостаточным механизмом поддержки в РФ.

Разработка методологической схемы получения функциональных ЭИЛ-покрытий

На рис. 6 и 7 представлены упрощенная и развернутая методологические схемы получения ЭИЛ-покрытий на ИП деталей машин, соответствующие седьмому уровню разработки методологии подразделов в науке о материалах (рис. 2).

На упрощенной схеме (рис. 6) не показаны все связи, однако видно, что решению функциональной задачи «ЭИЛ» $\Phi(x)$ (технология ЭИЛ) получения ИП с покрытием деталей предшествуют решения двух параллельно связанных функциональных задач $\varphi(x)$ и $F(x)$ создания или выбора и использования материалов катода и анода соответственно. Формулировка задач $\varphi(x)$ и $F(x)$ базируется на парадигме материаловедения [17–22], результаты решения сходятся на этапе ЭИЛ-технологии.

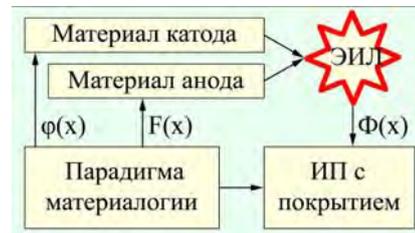


Рис. 6. Упрощенная методологическая схема ЭИЛ-покрытий ИП деталей.



Рис. 7. Развернутая методологическая схема получения ЭИЛ-покрытий на ИП деталей машин.

Более подробно исходные ветви $\Phi(x)$, $F(x)$ и $\varphi(x)$ (рис. 6) и их производные функциональные взаимосвязи раскрыты звеньями Φ (рис. 7) основной ветви (звенья 1 Φ –5 Φ) создания ИП деталей с покрытием. Эти звенья получены посредством преобразования связей составляющих звеньев ($\Phi_{(fn)} \rightarrow \Phi_{(1-5)} \rightarrow \Phi_{(cb)}$), а также связей двух производных ветвей $F_{(1-6)}$ и $\varphi_{(1-6)}$. Каждая из производных ветвей имеет сложный набор собственных взаимосвязей функциональных параметров $F_{(1-6)}$, $\varphi_{(1-6)}$ и их комбинаций, требующих создания специальных условий для осуществления технологий, предшествующих ЭИЛ-технологии получения покрытия. Реализа-

ция основной ветви функциональных связей звеньев Φ (1Φ – 5Φ) осуществляется по общей схеме пятизвенной парадигмы: «ФН \rightarrow состав \rightarrow технология \rightarrow структура \rightarrow свойства» и является результирующей. На ней сходятся итоги осуществленных процессов производных ветвей связей звеньев ($2F$ – $6F$ и звеньев 2ϕ – 6ϕ). Указанные производные связи звеньев содержат технологии получения анодного материала с требуемой структурой и свойствами электрода $F_{(1-5)}$ и материала основы детали (катода) $\phi_{(1-5)}$. В результате реализации связей $F_{(1-5)}$ и $\phi_{(1-5)}$ образуются звенья $6F$ и 6ϕ , обладающие необходимыми для осуществления ЭИЛ-технологии (звено 2Φ) свойствами $\Phi_{(a)}$ и $\Phi_{(k)}$ при формировании ЛС.

Следует отметить, что функционально защитное покрытие после финишной обработки детали (совокупность звеньев $\Phi_{(c)}$, $\Phi_{(ct)}$, $\Phi_{(cb)}$) является ее исполнительной поверхностью (ИП), которая в дальнейшем при эксплуатации испытывает различное воздействие (механическое, тепловое, химическое и пр.). ИП деталей машин (например, рабочие поверхности органов по переработке растительного сырья) подвергаются переменным ударным, тепловым и силовым нагрузкам, сложным физико-химическим процессам, микропроцессам в зоне резания, что ведет к их изнашиванию и затуплению. Они воспринимают экстремальные нагрузки в отличие от поверхности ориентирования деталей (основных конструкторских баз) и их свободных поверхностей, не требующих особых свойств. Поэтому для выбранного материала той или иной детали при уточнении $\Phi_{(a)}$ и $\Phi_{(1-2)}$ может формулироваться задача создания свойств покрытия $\Phi_{(cb)}$, требующих перехода от обычных свойств материала детали к повышенным свойствам поверхности воздействия, работающей в экстремальных условиях.

В идеальном случае для каждого покрытия в соответствии с его функциональным назначением и условиями эксплуатации существует только одно оптимальное соотношение свойств. При этом свойства от обычных значений основы стремятся постепенно, плавно усиливать до требуемых функциональных значений исполнительной поверхности воздействия. Функциональные взаимосвязи Φ_{1-5} реализуются через ряд других взаимосвязей и зависят, в первую очередь, от получения состава Φ_{2-3} и структуры Φ_{2-4} покрытия, определяемых взаимосвязями «ФНМ ИП детали \rightarrow состав ЛС» и «ФНМ ИП детали \rightarrow структура ЛС». Успех выбора прогнозируемых свойств, формирования связи $\Phi_{(2-5)}$ и $\Phi_{(cb)}$ зависит от формулировки и уточнения условий эксплуатации покрытия, имеющегося банка

научных данных, глубины анализа и осуществления технологии во взаимосвязи звеньев всех трех ветвей: Φ , F , ϕ , и в первую очередь от получения звеньев 3Φ и 4Φ посредством преобразования связей $\Phi_{(2-3)}$, $\Phi_{(c)}$ и $\Phi_{(2-4)}$, $\Phi_{(ct)}$ – получения состава и структуры ЛС.

Завершение реализации связей $\Phi \rightarrow \Phi_{(1-2)} \rightarrow \Phi_{(2-5)} \rightarrow \Phi_{(cb)}$ и окончательное формирование $\Phi_{(c)}$ состава и структуры $\Phi_{(ct)}$ ИП деталей с ЭИЛ-покрытием осуществляются через включение в технологию основной ветви двух новых замыкающих звеньев производных ветвей $F_{(1-6)}$ (анодный материал электрода) и $\phi_{(1-6)}$ (катодный материал детали). Эти связи участвуют в технологическом процессе, который преобразует через $\Phi_{(2-3)}$ и $\Phi_{(2-4)}$ прогнозируемые состав и структуру (звенья 3ϕ и 4ϕ) и обеспечивает реальные свойства детали с покрытием, достигаемые связями $\Phi_{(2-5)}$, $\Phi_{(cb)}$ замыкающих звеньев 2ϕ и 5ϕ («ЭИЛ – технология – свойства»). Создание защитных покрытий на ИП детали приводит к необходимости проектирования как основной исходной связи Φ , так и новых производных связей F_{1-6} и ϕ_{1-6} для формирования новых востребованных материалов покрытий (получения звеньев $6F$, 6ϕ). Указанные взаимосвязи диктуют необходимость фундаментального научного изучения, создания обоснованных научных рекомендаций, позволяющих назначать исходный состав материалов и выбор технологии покрытий.

Во всех случаях изучение, отработка и практическая реализация связей Φ параметров технологии при создании защитных покрытий деталей являются производной от исходного звена взаимосвязей $\Phi_{(фн)}$. Отметим важную роль звена 2ϕ (ЭИЛ-технология), что обусловлено конечным формированием требуемых свойств покрытий $\Phi_{(cb)}$ при наличии значительной номенклатуры пока еще не установленного полного перечня параметров технологического процесса ЭИЛ. Также отметим, что при создании защитных покрытий методом ЭИЛ особая роль отводится реализации связи Φ_{2-5} , которая осуществляется на заключительном этапе, ответственном за формирование конечного качества $\Phi_{(cb)}$ ЛС, и ему подчинена реализация всех предшествующих взаимосвязей: $F_{(1-6)}$, $\phi_{(1-6)}$, $\Phi_{(2-5)}$.

Появление сведений о многослойных покрытиях на основе нитридов, карбидов, боридов и других соединений тугоплавких металлов, а также с подслоями из чистых металлов – Ti, Ni, Cr, Mo, формируемых методами ФОП и ХОП, подтверждает перспективность проведения исследований в направлении использования связей ϕ и F с применением метода ЭИЛ.

Приведенный подход к созданию методологической схемы формирования новых защитных

покрытий может быть применен также к имеющим широкое распространение покрытиям методами ФОП и ХОП, другим методам.

ВЫВОДЫ

1. Показан подход к разработке методологии создания и упрочнения ИП деталей машин методом ЭИЛ, в основе которой использовался дедуктивный метод с постепенной уровневой конкретизацией и дополнением разрабатываемой тематики.

2. Разработаны основные методологические положения упрочнения и восстановления исполнительных поверхностей различных объектов из токопроводящих материалов методом ЭИЛ с учетом их функционального назначения.

3. Показана важная роль материала анода во взаимосвязи с материалом катода в процессе создания методологии функциональных покрытий ИП деталей.

ЛИТЕРАТУРА

- Spadło S. *Advanced Manufacturing Systems and Technology, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Courses and Lectures*. Wien, New York: Springer-Verlag, 2002, P. 515–524.
- Radek N., Bartkowiak K. *Phys Procedia*. 2010, **5**, 417–423.
- Chang-bin T., Dao-xin L., Zhan W., Yang G. *Appl Surf Sci*. 2011, **257**, 6364–6371.
- Victor Verbitchi, Cristian Ciuca, Radu Cojocaru. *Nonconventional Technologies Review*. 2011, (1), 57–62.
- Xie Y.J., Wang M.C., Huang D.W. *Appl Surf Sci*. 2007, **253**(14), 6149–6156.
- Ribalko A.V., Sahin O. *Surf Coat Technol*. 2003, **168**, 129–135.
- Николенко С.В., Верхотуров А.Д. *Новые электродные материалы для электроискрового легирования*. Владивосток: Дальнаука, 2005. 219 с.
- Zamulaeva E.I., Levashov E.A., Skryleva E.A., Sviridova T.A. et al. *Surf Coat Technol*. 2016, **298**, 15–23.
- Михайлов В.В., Бачу К.А., Пасинковский Е.А., Перетятку П.В. *ЭОМ*. 2006, (3), 106–111.
- Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И. и др. *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика)*. Саранск: Красный Октябрь, 2003. 504 с.
- Ляшенко Б.А., Соловых Е.К., Мирненко В.И. и др. *Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости*. Киев: Институт проблем прочности НАН Украины, 2010. 193 с.
- Верхотуров А.Д., Шпилев А.М., Евстигнеев А.И., Макиенко В.М. и др. *Ученые записки КнАГТУ*. 2012, **1**(10), 65–77.
- Верхотуров А.Д., Макиенко В.М., Воронов Б.А., Коневцов Л.А. *Ученые записки КнАГТУ*. 2013, **1**–3(15), 86–93.
- Верхотуров А.Д., Воронов Б.А., Коневцов Л.А. *Химическая технология*. 2012, (10), 623–636.
- Верхотуров А.Д., Воронов Б.А., Коневцов Л.А. *Вестник АмГУ. Серия естественные и экономические науки*. 2013, (62), 15–25.
- Верхотуров А.Д., Воронов Б.А., Макиенко В.М., Иванов В.И. и др. *Технология металлов*. 2014, (1), 3–10.
- Верхотуров А.Д., Ершова Т.Б., Коневцов Л.А. *Химическая технология*. 2006, (9), 11–15.
- Верхотуров А.Д., Шпилев А.М., Коневцов Л.А. *Химическая технология*. 2008, (5), 197–204.
- Верхотуров А.Д., Воронов Б.А., Коневцов Л.А. *Экология промышленного производства*. 2012, (1), 5–15.
- Верхотуров А.Д., Крюков В.Г., Коневцов Л.А. *Сборник статей по материалам LIX международной научно-технической конференции*. Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2016, (6), 45–61.
- Избранные труды профессора А.Д. Верхотурова*. Т. 3. *Материаловедение*. Под ред. А.И. Евстигнеев, Б.Я. Мокрицкий, В.А. Ким. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО "КнАГТУ", 2016. 313 с.
- Избранные труды профессора А.Д. Верхотурова*. Т. 1. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2016. 328–337.
- Верхотуров А.Д., Воронов Б.А., Романовский Н.П., Макиенко В.М. и др. *Вестник ДВО РАН*. 2013, (3), 101–108.
- Верхотуров А.Д., Воронов Б.А., Макиенко В.М., Коневцов Л.А. *Ученые записки КнАГТУ*. 2014, **1**–2(18), 86–94.
- Верхотуров А.Д., Воронов Б.А., Макиенко В.М., Коневцов Л.А. *Ученые записки КнАГТУ*. 2014, **1**–4(20), 74–82.
- Верхотуров А.Д., Коневцов Л.А. *Труды ГОСНИТИ*. 2010, **106**, 132–136.
- Верхотуров А.Д., Макиенко В.М., Иванов В.И., Коневцов Л.А. *Труды ГОСНИТИ*. 2015, **119**, 250–263.
- Верхотуров А.Д., Иванов В.И., Коневцов Л.А. *Социальные и гуманитарные науки на Дальнем Востоке*. 2015, (2), 153–160.
- Верхотуров А.Д., Макиенко В.М., Коневцов Л.А., Серенко А.Ф. *Ученые записки КнАГТУ*. 2013, **1**–3(15), 94–101.
- Верхотуров А.Д., Шпилев А.М., Коневцов Л.А. *Избранные труды профессора А.Д. Верхотурова*. Т. 1. Общие проблемы науки о материалах на современном этапе развития человеческой цивилизации. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2016. 182–195.
- Kislyi P.S. *Sci Sinter*. 1978, (6), 25–31.
- Г.В. Самсонов – ученый, учитель, друг. Киев: Наукова Думка, 2012. 192 с.

33. Верхотуров А.Д., Козырь В.А., Коневцов Л.А. *Научные основы разработки и получение слоистых материалов на поверхности твердых сплавов*. Владивосток: Дальнаука, 2016. 475 с.

Поступила 29.08.17

После доработки 19.01.18

Summary

The work is devoted to achieving the required functional properties of the functional surfaces of various objects: machine parts and technological equipment, tools for mechanical processing of materials in the cold and hot state, by processing them by the electrospark alloying (ESA). The aim of the work was to develop a methodology for getting functional surfaces of components for

various purposes by applying ESA and to justify the criteria and parameters for evaluating this method. In the first part of the investigation, a number of methodological schemes related to obtaining functional ESA coatings are considered. The main methodological provisions for hardening and restoring the functional surfaces of various objects from conductive materials using ESA are considered, taking into account their functional purpose and the important role of the anode material in interrelation with the cathode material in the process of creating coatings.

Keywords: electrospark alloying, methodology, functional properties, detail, functional surface, technology, anode, cathode.