

СОДЕРЖАНИЕ

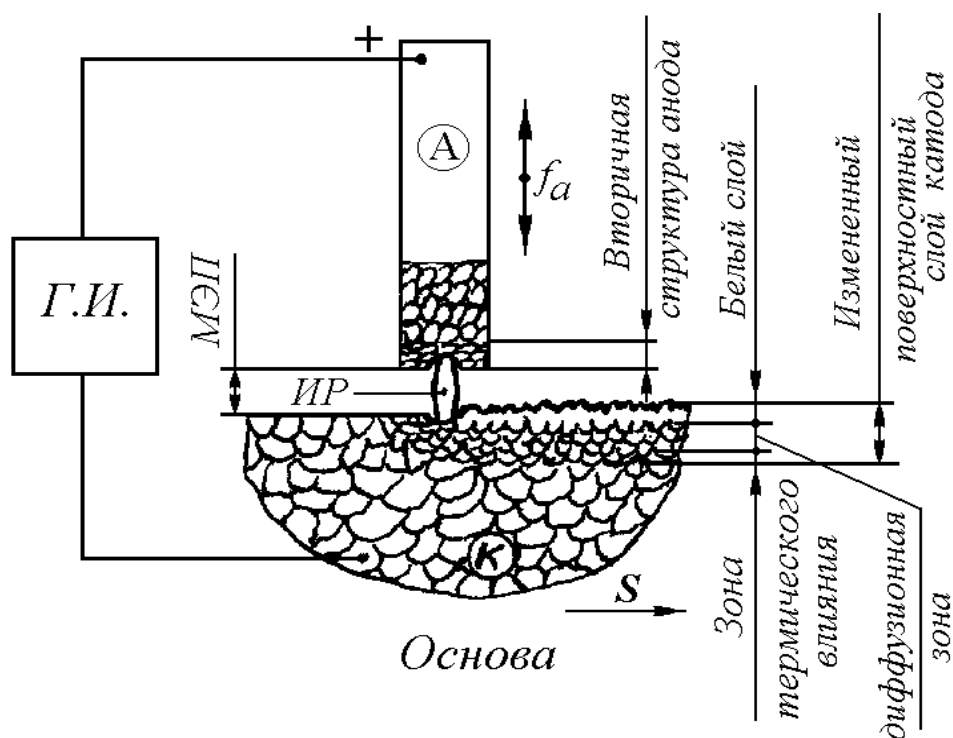
<u>1.1. Физические основы процесса электроискрового легирования</u>	2
<u>1.1.1. Принципиальная схема процесса ЭИЛ</u>	2
<u>1.1.2. Модель процесса ЭИЛ Б.Р.Лазаренко и Н.И.Лазаренко</u>	4
<u>1.1.3. Обобщённая модель процесса ЭИЛ А.Д. Верхотурова</u>	5
<u>1.2 Эрозия материалов электродов</u>	10
<u>1.3. Формирование изменённого поверхностного слоя (ИПС) при ЭИЛ</u>	16
<u>1.4. Формирование многослойных покрытий</u>	22
<u>1.5. Физико-химические свойства легированного слоя</u>	25
<u>1.6. Электродные материалы используемые для ЭИЛ</u>	28
<u>1.7. Оборудование для ЭИЛ</u>	31
<u>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</u>	37

1.1. Физические основы процесса электроискрового легирования

1.1.1. Принципиальная схема процесса ЭИЛ

Способ электроискровой обработки металлов, разработанный Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [1], основан на явлении электрической эрозии материалов при искровом разряде в газовой среде (преимущественно на воздухе), полярного переноса продуктов эрозии на катод (деталь), на поверхности которого формируется слой измененной структуры и состава. В результате электрического пробоя межэлектродного промежутка возникает искровой разряд, в котором поток электронов приводит к локальному разогреву электрода (анода). На поверхности катода под действием значительных тепловых нагрузок происходят микрометаллургические и сопутствующие им процессы (термомеханические, гидродинамические, диффузионные), осуществляющие перемешивание материала катода и анода, при взаимодействии с компонентами газовой среды, что способствует образованию высокой адгезии между основой и формируемым слоем. Поэтому электроискровое легирование следует считать методом создания новых композиционных материалов. В первую очередь это относится к тугоплавким покрытиям, наиболее существенно и принципиально изменяющим свойства верхнего слоя материала. Величина этих изменений определяется составом, структурой, свойствами материалов электродов и технологическими параметрами процесса ЭИЛ.

На рис 1.1 приведена общая схема процесса ЭИЛ с вибрирующим анодом в виде компактного электрода и изображение образующегося верхнего слоя. Процесс ЭИЛ начинается со сближения анода (электрода) с катодом (деталью). При расстоянии между ними равном пробивному начинается развитие искрового разряда длительностью 10^{-6} - 10^{-3} с, который во многих случаях завершается при контакте электродов [221].



Г.И. - генератор импульсов,
 МЭП - межэлектродный промежуток,
 ИР - искровой разряд,
 А - анод (компактный электрод),
 К - катод (деталь),
 f_a - частота вибрации анода,
 S - направление подачи детали.

Рис.1.1. Общая схема процесса ЭИЛ.

При небольших напряжениях между электродами ($U < 100V$) возможно контактное начало разряда от накопительного конденсатора генератора импульсов. После пробоя межэлектродного промежутка (МЭП) за счет энергии, поступающей от генератора импульсов, на поверхностях электродов развиваются 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. После окончания импульсного искрового разряда и отхода анода от катода завершается разрыв электрической цепи. Реализация непрерывного процесса ЭИЛ за счет периодической коммутации анода с катодом осуществляется с

помощью специальных устройств, например, вибратора с закрепленным на нем анодом. Конструктивно разработаны и другие устройства периодической коммутации, в том числе и для процессов формирования покрытий методом ЭИЛ порошковыми материалами.

1.1.2. Модель процесса ЭИЛ Б.Р.Лазаренко и Н.И.Лазаренко

Наиболее полно физическая модель процесса была изложена в работе основоположников метода ЭИЛ Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко [4] и заключается в следующем: при сближении электродов напряженность электрического поля между ними увеличивается и, достигнув определенной величины, вызывает пробой промежутка между электродами. Через возникающий канал сквозной проводимости пучок электронов фокусированно ударяется о твердую металлическую поверхность анода. Энергия движения остановленных электронов выделяется в поверхностных слоях анода. Энергия от специального источника питания импульсно подводится к разрядному промежутку, поэтому плотность тока в канале значительно превосходит критические значения. Вследствие этого металл анода локально разогревается, расплавляется и частично испаряется. Капля расплавленного металла отделяется от анода и, опережая его, движется к катоду. В процессе отделения от анода летящая капля успевает нагреться до высокой температуры, закипает и взрывается. Цепь тока прерывается, фокусирующее действие электромагнитного поля исчезает, и образовавшиеся частицы летят широким фронтом. Поскольку перегретая капля и частицы находятся в газовой среде, возможно образование химических соединений, вследствие чего отделившиеся от анода частицы могут отличаться от материала анода. Достигнув катода, расплавленные частицы анода свариваются с ним и частично внедряются в его поверхность. Движущийся за частицами электрод-анод механически ударяет о катод, перемешивая частицы анода. При этом протекают процессы диффузии и химических реакций. Механический удар по раскаленной массе металла проковывает полученное покрытие, увеличивая его однородность и плотность. Так как процесс носит локальный характер, имеет место и сверхскоростная

закалка. После этого электрод-анод отходит от катода, а на поверхности последнего остается прочно соединенный с ним слой материала анода.

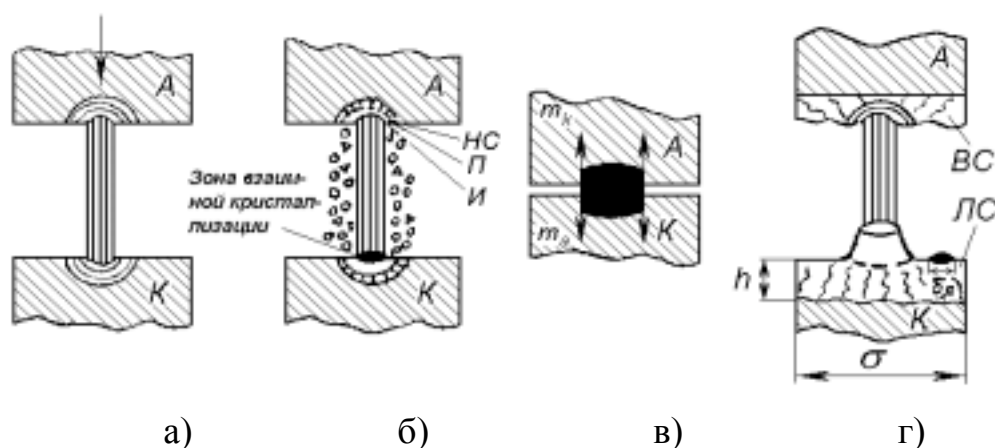
Эта модель процесса разработана для высоких напряжений между электродами. При ЭИЛ, где используют напряжения не выше 100-200В, пробой межэлектродного промежутка происходит практически при контакте электродов - зазор 5-10 мкм - через частицы, находящиеся в воздухе или на поверхности электродов. При контактном начале пробоя на первом этапе происходит электрический взрыв контактного мостика, обеспечивающий предварительную очистку поверхности и последующее формирование межэлектродного пространства для развития плазменного разряда [5]. На сблизившиеся жидкие объемы анода и катода действуют гидродинамическое давление факелов, газокINETическое давление со стороны канала проводимости, сила электрического поля, электродинамическая сила, реактивное давление. Механизм образования покрытия при ЭИЛ дополняется в работах Н.И. Лазаренко [6, 7], согласно которому выброс металла происходит и с поверхности катода. На поверхности последнего образуется лунка с краями, несколько приподнятыми над первоначальной поверхностью. Поэтому при электроискровом легировании поверхность обрабатываемой детали представляет собой совокупность гребней и впадин, геометрические размеры и частота следований которых определяет шероховатость, сплошность обработанной поверхности. Отдельные моменты этой модели требуют ряда уточнений и дополнений.

1.1.3. Обобщённая модель процесса ЭИЛ А.Д. Верхотурова

Обобщённая модель процесса ЭИЛ [27] отличается от модели Лазаренко [3, 16, 28, 6] кинетикой процесса и учётом поверхностных явлений на аноде и катоде, которые включают: разрушение электродов в жидкой, паровой и твёрдых фазах; схватывание их в момент контакта; изменение свойств рабочих поверхностей за счёт переноса материала и импульсных нагрузок; наличие на катоде в зоне действия искры микрованны, обеспечивающей перекристаллизацию материалов и их физико-химическое взаимодействие;

ограничение толщины слоя за счёт внутренних напряжений и термоусталости; дискретный характер формирования легированного слоя.

Анализ литературных данных и экспериментальных исследований электроискровых покрытий различными классами материалов в сочетании со спектральной диагностикой плазмы и её осциллографирование приводят автора [27] к следующей обобщённой модели немеханизированного вибрационного легирования (рис. 1.2).



- а - пробой межэлектродного промежутка,
 б - образование эрозионных лунок на аноде и катоде с тремя зонами: (И) - испарения, (П) - плавления, (НС) - напряжённого состояния;
 в - момент контакта электродов, которому сопутствует схватывание и обратный перенос;
 г - формирование на аноде вторичной структуры (ВС) и легированного слоя на катоде.

Рис.1.2. Обобщённая модель процесса ЭИЛ

Искровой разряд оказывает на материал электродов импульсное тепловое и механическое воздействия. Поток электронов приводит к локальному разогреву электрода (анода), а поперечное магнитное создаёт высокое давление в плазменном шнуре разряда, в котором реализуется средняя электронная температура $T_e \sim (5...7) \cdot 1000 \text{ K}$ со средней электронной плотностью $n_e \sim (4...13) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (рис. 1.2. -а). В результате этого воздействия на поверхности электродов появляются объёмные источники тепла приводящие к возникновению эрозионных лунок на аноде и катоде.

В самой лунке можно выделить три зоны: испарения, плавления и напряжённого состояния (рис. 1.2. -б). Размер зон плавления и испарения тем
 Из материалов кандидатской диссертации Яркова Д.В. « ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ЭИЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА »

больше, чем меньше температура плавления ($T_{пл}$), кипения ($T_{кип}$) и коэффициент теплопроводности материала электрода (λ). Зона напряжённого состояния возникает за счёт волны термических и термомеханических напряжений в результате импульсного нагрева, реактивного воздействия плазменной струи и её расширение в момент спада тока в импульсе [24]. Расчёт по формуле Б.Н. Золотых внутренних термических напряжений, возникающих в поверхностном слое молибдена и железа при действии импульсного источника тепла, показывает [29], что изменение напряжений носит волновой характер, причём внутренние напряжения изменяются от растягивающих до сжимающих, затухая с увеличением расстояния от источника. Большие значения растягивающих напряжений на рабочей поверхности электрода являются основной причиной образования трещин и создания твёрдофазной эрозии, вклад которой в общий эрозионный эффект зависит от режимов обработки и гомеопolarity межатомной связи в материале электрода.

Полярный перенос эродированного материала анода на катод позволяет в процессе ЭИЛ формировать на катоде поверхностные слои, являющиеся результатом взаимодействия между собой материалов электродов и среды МЭП. Преимущественный перенос материала анода на катод определяется соотношением эрозии материалов анода и катода [23]

$$\Delta^a \gg (\Delta_T^k + \Delta_{эп}^k), \quad (1.1)$$

где Δ^a - удельная эрозия анода; Δ_T^k и $\Delta_{эп}^k$ - удельная эрозия катода соответственно в твердой и жидко-паровой фазе.

Используя критерий взаимодействия материалов при электроискровой обработке [13], связанный с физическими константами материалов электродов, и зависимость для относительной эрозионной стойкости [183], соотношение (1.1) можно записать в виде

$$\frac{\Delta^a}{\Delta_T^k + \Delta_{эп}^k} = \frac{C_k \cdot \rho_k \cdot \lambda_k \cdot (T_{пл}^k - T_{хл}^k)^2}{C_a \cdot \rho_a \cdot \lambda_a \cdot (T_{пл}^a - T_{хл}^a)^2} \gg 1, \quad (1.2)$$

где C , ρ , λ - соответственно теплоёмкость, плотность и теплопроводность; $T_{пл}$, $T_{хл}$ - температуры плавления и хладноломкости материалов анода и катода.

Экспериментально установленные условия преимущественного переноса материала с анода на катод (1.1) и соотношение (1.2) подтверждают следующее предпочтительное соотношение между теплофизическими характеристиками материалов электродов [221]:

$$\lambda_a \leq (5...6)\lambda_k; \quad T_{пл}^a \leq (3...4)T_{пл}^k. \quad (1.3)$$

Дополняя соотношение (1.2) учётом ковалентности межатомной связи материалов анода α_a^* и катода α_k^* , их взаимной растворимости, Верхотуровым А.Д. предлагается следующее определение критерия выбора материала легирующего электрода D_m :

$$D_m = \frac{C_k \cdot \rho_k \cdot \lambda_k \cdot (T_{пл}^k - T_{хл}^k)^2}{C_a \cdot \rho_a \cdot \lambda_a \cdot (T_{пл}^a - T_{хл}^a)^2} \times \frac{r_k}{(r_a - r_k) \cdot \alpha_a^* \cdot \alpha_k^*} \gg 1, \quad (1.4)$$

где r_a , r_k - соответственно, атомный радиус материала анода и катода.

Из нескольких сравниваемых материалов при большем значении D_m предпочтительнее является использование материала анода по переносу его на катод в жидко-паровой фазе. Для металлов значение коэффициента $1/\alpha_a^* \alpha_k^* \approx 1$. Тогда взаимная растворимость материалов электродов, оцениваемая соотношением атомных радиусов материалов анода r_a и катода r_k , является определяющей.

Кроме полярного эффекта, связанного со свойствами материалов электродов, на явление переноса значительное влияние оказывают величина МЭП, энергия импульсного разряда, частота следования импульсов, величина вибрации анода, изменение свойств поверхностей электродов в процессе взаимодействия импульсного разряда, перенос продуктов эрозии с катода на анод, а также свойства межэлектродной среды. Переносимый эродированный материал анода в плазменном потоке состоит из жидкой, паровой и твердой фазы. При этом частицы материала анода твердой фазы размером 1-2 мкм, как правило, не закрепляются на поверхности катода.

Механический контакт электродов также сопровождается интенсивным химическим взаимодействием материалов, схватыванием и переносом материала с катода на анод за счет эффектов Томсона, Колляра и Пелтье [26]. Эффект схватывания электродов при ЭИЛ подробно исследован А.Д.Верхотуровым [32]. Электронная природа эффекта схватывания обуславливает закономерное влияние его на эрозию переходных металлов. Переходные металлы IV группы, характеризующиеся большой долей нелокализованных электронов, проявляют наибольшую склонность к схватыванию. Переход к металлам VI группы понижает этот эффект. Образование на рабочих поверхностях металлических электродов оксидных и нитридных фаз препятствует схватыванию электродов, увеличивает их эрозию в процессе ЭИЛ на воздухе. Схватывание электродов и образование вторичной структуры на рабочей поверхности анода изменяют возможность представления в виде абсолютного ряда металлов по их полярному переносу.

Многократное взаимодействие искровых разрядов приводит к ограничению толщины ЛС. Основными причинами, вызывающими ограничение ЛС, являются:

- 1) накопление внутренних напряжений, в том числе за счёт образования в покрытиях новых фаз с различными коэффициентами термического расширения;
- 2) уменьшение термоусталости покрытия в условиях многократных циклов нагрева и охлаждения его микрообъемов (оба фактора взаимосвязаны и дополняют друг друга);
- 3) образование ультрадисперсной структуры.

Таким образом, большое число факторов, влияющих на полярный перенос, затрудняет однозначную формулировку общего критерия полярного переноса при ЭИЛ. Используя выражения (1.3, 1.4) можно выполнить предварительную оценку возможности переноса материала анода и образования покрытия на катоде.

Главным достоинством обобщённой модели процесса ЭИЛ А.Д. Верхотурова является возможность управления эксплуатационными свойствами покрытия варьированием физико-химических и структурных характеристик электродных материалов. Однако эта модель не учитывает взаимосвязи: микротвёрдость электродного материала - микротвёрдость легированного слоя - износо-, жаростойкости полученного покрытия. Она также требует дополнений и уточнений.

1.2 Эрозия материалов электродов

Эффективность процесса ЭИЛ тем выше, чем большее количество материала анода разрушится и закрепится на поверхности катода за единицу времени. В литературе имеются отдельные, противоречивые сведения о влиянии процесса эрозии на формирование ЛС. Так, в [7] подчёркивается независимость процессов, происходящих на аноде и катоде при ЭИЛ, с другой стороны в [21, 22, 23] сделана попытка установления закономерностей между эрозией материала анода, состоянием поверхности катода и формированием ЛС. Эрозия материала электродов наиболее полно рассмотрена применительно к электроэрозионной обработке (ЭЭРО) [2, 8, 9, 10, 11, 12, 24, 25, 28, 121, 122, 123, 124-130] в отличие от ЭИЛ, для которого данные по эрозии стали более интенсивно изучаться в последнее время [17, 21, 23, 30, 66, 131, 132]. Большинство исследователей метода ЭИЛ считают, что закономерности эрозии электродов при ЭИЛ сходны с таковыми при ЭЭРО, хотя состав межэлектродной среды, электрические параметры разряда существенно изменяют условия протекания основных физико-химических процессов в приповерхностных слоях электродов.

В настоящее время существуют две теории эрозии материала электродов при ЭЭРО - электродинамическая [124-126] и тепловая [24, 127]. Согласно первой теории, поверхность электрода подвергается, как бы действию ударов потоков мелких и тяжёлых капель [8]; происходит плавление мишени, воспринимающей удар, за счёт тепла, полученного при торможении

материальных частиц, и последующий выброс волной расплавленного и размягчённого материала.

Тепловая теория электрической эрозии металлов разработана Б.Н.Золотых [24, 25, 122, 127, 128]. После пробоя межэлектродного промежутка на поверхности электродов под воздействием потоков электронов на анод и ионов на катод возникают плоские, локализованные на небольших участках поверхности источники тепла, под действием этих процессов металл на поверхности электрода плавится и частично испаряется, в результате чего на поверхности электрода к концу импульса образуется лунка, в значительной части заполненная расплавленным и перегретым металлом. Такая картина наблюдается при относительно небольших удельных мощностях источника тепла $10^4 \dots 10^5$ Вт/см² и длительности импульса $10^{-3} \dots 10^{-5}$ с. При этом из лунки удаляется не более 5...40% металла. При больших значениях удельной мощности (10^6 Вт/см²) при длительности импульса 10^{-6} с, доля испарения может составить до 80% металла, подвергшегося нагреву до высоких температур за счёт плоского источника тепла. Делается вывод, что металл удаляется из лунки за счёт испарения и силы выбрасывающие металл из лунки обязаны своим происхождением гидро- и газодинамическим процессам, протекающим в межэлектродном зазоре и в приповерхностных слоях электродов. Утверждается, что гидродинамический механизм выброса жидкого металла с поверхности электродов является основным для металлов и сплавов с обычными пластическими и прочностными свойствами и действует при длительности импульса, более чем 10^{-6} с. Для тугоплавких металлов с низким пределом прочности удаление металла из зоны воздействия импульса может происходить в твёрдой фазе за счёт хрупкого разрушения поверхностных слоёв, под действием термических напряжений. Для существенно гетерогенных по теплофизическим и механическим свойствам материалов могут оказаться действующим одновременно и гидродинамический выброс и хрупкое разрушение. В реальных условиях электроискровой обработки роль факелов сводится, главным образом, к передачи некоторого количества тепла

противоположному электроду или переносу некоторого количества материала с одного электрода на противоположный.

Общим у электродинамической и тепловой теории является то, что основной причиной передачи энергии электродам считается бомбардировка их электронами, ионами и нейтральными атомами, обладающими большой кинетической энергией. Эти теории подтверждаются экспериментально и не противоречат, а дополняют друг друга.

Наряду с изложенными представлениями появились и другие, объясняющие выброс металла немного иначе. Так, в [134], авторы приходят к выводу о том, что при воздействии на электрод импульсного разряда в теле электрода распространяется быстрозатухающая термоупругая волна, которая может явиться причиной выброса вещества в зону разряда вследствие удаления частиц под влиянием термоупругих напряжений. Далее Е. Вильямс [135] исходил из того, что вследствие малого сечения канала разряда и большой плотности его у поверхности электрода возникает поле, обеспечивающее вырывание кусков твёрдого металла. Выводы Вильямса имеют частное значение применительно к хрупкому разрушению [130] которое, однако, на практике часто реализуется.

Авторы метода электроискровой обработки Лазаренко определили электрическую эрозию как “физическое явление, заключающееся в направленном выбрасывании материала электродов под действием самостоятельного электрического разряда, протекающего между ними”. Если при этом электроды окружены газовой средой, то в большинстве случаев описанное явление сопровождается отложением выброшенного материала на противоположном электроде [136-138], что в свою очередь изменяет условия протекания разряда. В этом, собственно, состоит основное отличие эрозии в процессе ЭИЛ от эрозии электродов при ЭЭРО; в последнем случае использование жидкой среды и отсутствие периодического контакта между электродами препятствует отложению эродируемого материала на катоде.

Исследования физической природы и механизма электрической эрозии в работах [25, 180] определили следующие основные закономерности, подтвержденные экспериментальными данными:

1. Интегральный эффект эрозии при электроискровой обработке согласно правилу аддитивности [180] представляет собой простую сумму эрозионного эффекта единичных импульсов, т.е. справедливо следующее соотношение:

$$\gamma = \sum_{i=1}^{i=N} \gamma_i, \quad (1.5)$$

где γ - интегральная величина эрозии; γ_i - величина эрозии за один i -ый импульс, N - общее количество импульсов, зависящее от времени ($N(t)$).

2. Величина эрозии электродов, при прочих равных условиях, прямо пропорциональна количеству энергии, выделившейся в промежутке, и определяется для анода и катода [25]:

$$\gamma_a = N \cdot K_a \cdot W_i; \quad (1.6)$$

$$\gamma_k = N \cdot K_k \cdot W_e, \quad (1.7)$$

где K_a и K_k - коэффициенты пропорциональности соответственно для анода и катода, зависящие от теплофизических свойств материала электродов и длительности импульсов; W_i - энергия в импульсе.

3. Все материалы располагаются по своей эрозионной устойчивости в определённой последовательности, а состав межэлектродной среды существенно влияет на положение области инверсии металлов [16, 136, 139].

Важно выяснить корректность этих положений (предложенных Б.Р.Лазаренко на основании законов Фарадея) применительно к процессу эрозии при ЭИЛ, имея ввиду его отличия от метода ЭЭРО. Согласно Фарадею [140], они будут справедливы в случае ионного переноса. Однако при электроискровой обработке перенос вещества возможен в жидкой, паровой и твёрдых фазах.

Известно [61], что при ЭЭРО рабочая поверхность катода насыщается углеродом. Такое изменение фазового состав приповерхностных слоёв электродов должно приводить к временному изменению эрозии в процессе

обработки, особенно при ЭИЛ из-за наличия периодического контакта электродов, способствующих диффузионному перемещению вещества. При действии искровых разрядов в поверхностных слоях образуются крайне неравновесные фазы, возникают большие внутренние напряжения, соизмеримые с допускаемыми [130]; их накопление может приводить к хрупкому разрушению электродов. Однако в литературе отсутствуют сведения о влиянии фазового состава и напряжённого состояния электродов на их эрозию. В работе А.Д. Верхотурова [131] выполнен расчёт внутренних напряжений возникающих в поверхностном слое Мо и Fe. Основные выводы этой работы: - возможность возникновения твёрдофазной эрозии не только при охлаждении расплавленного материала за счёт термических трещин, но и в процессе локального импульсного нагрева за счёт волны растягивающих и сжимающих напряжений, способствующих охрупчиванию поверхностного слоя электрода при циклических нагрузках. Однако в этой работе тоже не рассматривается влияние фазового состава и напряжённого состояния на эрозию материалов электродов.

В работах Б.Н. Золотых [24, 130] показана возможность удаления вещества при искровом разряде не только в паровой и жидкой фазах, но и в твёрдой фазе в результате хрупкого разрушения, что ставит под сомнение корректность второго и третьего положений о механизме эрозии при ЭИЛ. Наблюдаемая экспериментально в некоторых случаях взаимосвязь эрозионной стойкости с физико-механическими константами материала [13, 25, 139, 141, 142] привела к выводу, что уровень теплофизических свойств (температура плавления, температура испарения, теплота сублимации) и других, характеризующих силу межатомной связи (модуль упругости), определяет эрозионную стойкость материала электрода.

На этом основании предпринимались неоднократные попытки установить связь с одним из указанных свойств [139, 143] или их комплексом [24, 33, 139, 144, 145] с целью определить критерии эрозионной стойкости (критерии Палатника, Альбински, Золотых) и соответствующие им ряды металлов. Такой

подход полностью игнорирующий влияние структурных факторов на эрозию и позволяющий непосредственно связать эрозионную стойкость материалов с особенностями их электронного строения, корректен лишь в случае эродирования вещества в паровой и жидкой фазах.

Возможность хрупкого разрушения материалов в процессе ЭИЛ предполагает влияние на эрозию также структуры материалов и механических свойств. В этом аспекте представляет интерес изучение относительного влияния на эрозию теплофизических и механических характеристик материала в зависимости от режимов обработки и межэлектродных сред. Таких данных до исследовательских работ А.Д. Верхотурова не было.

Таким образом, эрозия материала анода в общем случае должна происходить в паровой, жидкой и твёрдой фазах, т.е.

$$\Delta_a = \Delta_{и} + \Delta_{пл} + \Delta_{тв} \quad (1.8),$$

где: $\Delta_{и}$, $\Delta_{пл}$, $\Delta_{тв}$ - масса вещества, удаляемая за один импульс, соответственно в паровой, жидкой и твёрдой фазах.

В процессе изучения зависимостей протекания электрической эрозии установлен эффект полярности [180], под которым понимают превышение величины эрозии одного электрода над другим. Количественным критерием полярности может служить величина относительной эрозии катода

$$\Delta\gamma_k = \gamma_k / \gamma_a \quad (1.9)$$

Если $\Delta\gamma_k < 1$ - полярность положительна, если $\Delta\gamma_k > 1$ - полярность отрицательна.

Исследованиями установлено [25], что для различных пар металлов эффект полярности сопоставим с температурой плавления анода и катода, т.е. если $T_{пл}^k \geq T_{пл}^a$, то $\Delta\gamma_k < 1$; если $T_{пл}^k < T_{пл}^a$, то $\Delta\gamma_k > 1$.

Это свидетельствует, что в эффекте полярности теплофизические факторы оказывают значительное влияние. Была также установлена зависимость $\Delta\gamma_k = f(t_u)$ для различных значений W_u в случае, когда анод и катод

изготовлены из одного материала, что указывает на связь эффекта полярности с элементарными процессами в канале разряда и на поверхности электродов.

Следует отметить, что только в последнее время в литературе стали публиковать работы об эрозии материала анода. На практике, как правило, в качестве материала легирующего электрода применяют наиболее твёрдые и износостойкие материалы. Однако эти же свойства обеспечивают и высокую эрозионную стойкость, что значительно уменьшает производительность процесса ЭИЛ. Поэтому одной из задач разработки электродных материалов является создание высокопрочных, твёрдых, износостойких материалов, в то же время обладающих высокой эрозионной способностью.

1.3. Формирование изменённого поверхностного слоя (ИПС) при ЭИЛ

При выполнении процесса ЭИЛ последовательным локальным воздействием импульсных разрядов на участках обрабатываемой поверхности формируется изменённый поверхностный слой (ИПС). Формирование ИПС является заключительным этапом динамического процесса ЭИЛ, при котором в едином цикле происходит пробой МЭП, эрозия и перенос материала анода на катод при перемещении электродов. Исследования этапов эрозии анода и образования слоя на катоде при различных условиях обработки впервые детально были выполнены Н.И.Лазаренко [3, 68, 41]. Установлено, что качественные и количественные характеристики образуемого поверхностного слоя в процессе ЭИЛ зависят от многих факторов. Наибольшее влияние оказывают характеристики импульсных разрядов, длительность обработки, природа материала электродов, среда в МЭП, вид движения анода. Даны практические рекомендации:

1. В процессе ЭИЛ привес катода изменяется нелинейно, особенно на жестких (грубых) режимах (рис. 1.3); данному электрическому режиму соответствует определённая максимальная толщина слоя.

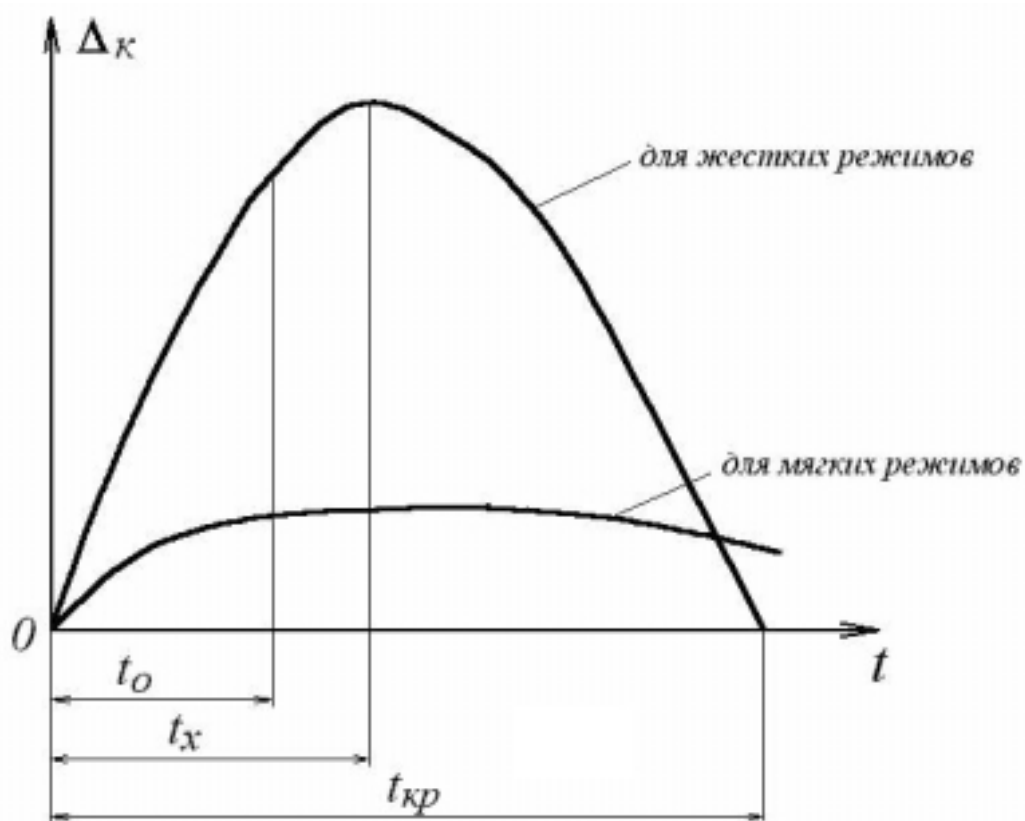
2. Для уменьшения шероховатости поверхности необходимо уменьшить энергию единичных импульсов при максимальной частоте следования.

3. Чем более инертна межэлектродная среда, тем больше время обработки единицы площади катода и толще наносимый слой.

4. Для получения возможно более толстых и сплошных слоёв с достаточно чистой поверхностью следует использовать средние по энергии импульсы (около 1 Дж).

5. Для ликвидации схватывания электродов в момент контакта рекомендуется уменьшить энергию импульсов и увеличить амплитуду вибрации анода.

6. Сплошность покрытия тем больше, чем меньше шероховатость легируемой поверхности.



t_0 - оптимальное время ЭИЛ; t_x - порог хрупкого разрушения легированного слоя;
 $t_{кр}$ - критический порог разрушения легированного слоя.

Рис. 1.3. Схематическая зависимость изменения привеса катода от времени легирования [7, 68]

Также установлено, что в результате протекания единичного искрового разряда в точках соприкосновения канала разряда с поверхностью электродов имеет место выброс материала электродов с образованием на их поверхности

лунки с краями, несколько приподнятыми над поверхностью металла. Размер лунки зависит от электроэрозионной устойчивости материала электродов и энергии электрического импульса. При многократном действии импульсов в одну точку на катоде образуется вместо слоя переносимого материала сильно увеличенная в размерах лунка, что приводит к необходимости постоянного перемещения легирующего электрода относительно зоны воздействия разряда на катоде.

Если скорость перемещения электрода такая, что к моменту следующего импульса электрод успеет сместиться на диаметр лунки, то поверхность катода после однократного прохода электрода будет иметь зубчатый профиль, в котором зубцы образованы краями соседних лунок. При смещении точки приложения последующего импульса на величину меньшую, чем диаметр лунки, разряд будет протекать через наиболее выступающую часть поверхности, т.е. в край лунки, образованный предыдущим разрядом. При этом часть металла с края лунки переместится к её центру. Таким образом, на катоде одновременно с образованием ЛС, будет происходить перемещение расплавленных и размягчённых зон материала электродов. Экспериментально установлено [6], что если контактирующая площадь анода больше площади образующейся лунки, то наиболее качественный слой получается при смещении электрода на $1/4$ диаметра лунки.

Эти рекомендации даны исходя из практического использования ЭИЛ, и не охватывают вопросов влияния состава, структуры материала электродов, их схватывания на процесс формирования ЛС.

Для получения качественных толстослойных покрытий (до 100-300 мкм и выше) необходимо обеспечить эрозию материала анода преимущественно в капельно-жидкой фазе [147, 148] и по возможности уменьшить содержание в продуктах эрозии паровой фазы, распыляющей капельно-жидкую. Для создания условий интенсивного переноса материала анода на катод и прочного сцепления с деталью необходимо, чтобы процессы на электродах носили резко асимметричный характер; в первую очередь асимметрия должна проявляться в

распределении температуры вдоль межэлектродного промежутка - частицы металла со стороны катода должны охлаждаться быстрее, чем со стороны анода.

К основным видам переноса и взаимодействия веществ электродов при ЭИЛ относятся [13]:

- 1) Образование покрытий на катоде из материала анода;
- 2) Образование сплавов (смесей, твёрдых растворов и интерметаллидов) в поверхностном слое катода в результате взаимной диффузии элементов катода и анода;
- 3) Перенос вещества с катода на анод с образованием покрытий.

Эффективность использования на практике метода ЭИЛ в значительной степени определяется оптимальным подбором параметров процесса, однако наибольшую сложность представляет выбор оптимального удельного времени легирования (t_0). Это связано с нелинейным изменением массы образца в процессе ЭИЛ (рис. 1.3): начиная с удельного времени легирования t_x масса образца уменьшается, т.е. привес катода (Δ_k) становится отрицательным. С повышением удельного времени легирования $t > t_x$ масса образца может принять значение меньше первоначальной. В общем случае линейное увеличение массы образца при изменении t наблюдается только при $t < t_x$.

С изменением режимов обработки и особенно материалов электродов и межэлектродных сред зависимость $\Delta_k = f(t)$ может существенно изменяться, что затрудняет возможность аналитического определения t_0 . Всё ещё нет единого мнения о критерии выбора t_0 . Выбор t_0 (при различных электрических режимах и межэлектродных средах), а также материалов легирующих электродов по существу составляет основу технологии ЭИЛ.

Лазаренко установили, что максимум привеса катода зависит от величины энергии импульсов, природы материала электродов и газовой среды, [3, 7, 68, 150]. Причём характер переноса вещества анода на катод при “грубом” и “чистовом” легировании во времени различен: в последнем случае время

достижения максимума привеса катода больше, а уменьшение привеса происходит медленнее.

Экспериментально установлено [151], что чем более инертна среда, окружающая электроды, тем больше допустимая удельная продолжительность легирования и тем большее количество материала можно нанести на катод.

Химический анализ легированных на воздухе поверхностей показал, что содержание в них кислорода и азота повышается с увеличением энергии импульсов, удельной продолжительности легирования и с использованием в качестве электродов менее жаростойких материалов.

Разрушению нанесённого слоя в большой степени способствует кислород воздуха, т.к. в водородной и аргоновой средах увеличение количества материала анода, перенесённого на катод, происходит более длительное время и максимальный привес достигает большей величины, чем при упрочнении на воздухе [7, 68]. Тем не менее, даже применение водородных и аргоновых сред не позволяет получать плотные слои толщиной более 0,5 - 1 мм.

Таким образом, влияние кислорода воздуха на характер формирования ЛС не изучено, можно только утверждать, что изменением состава межэлектродной среды не удаётся существенно повысить толщину ЛС. Различного рода загрязнения (окислы, нитриды) будут оказывать влияние на сплошность покрытия, препятствуя соединению между собой более крупных частиц переносимого материала, и ухудшают условия схватывания переносимого материала с основой [21]. На взгляд авторов [21], основной причиной ограничения толщины слоя при ЭИЛ является его хрупкое разрушение в результате термических и усталостных напряжений, которое начинается уже после 2-3 проходов.

Общее выражение привеса катода, учитывающее перенос материала анода на катод, эрозию материала катода от единичного искрового разряда и его хрупкое разрушение под воздействием циклических нагрузок, имеет следующий вид

$$M_k = M_a \bar{K} - M_{\text{эр}}^k, \quad (1.10)$$

где M_a - количество удаленного материала анода за время легирования t (суммарная эрозия материала анода); $\bar{K}$ - усредненный коэффициент переноса материала анода на катод; $M_{\text{эп}}^k$ - суммарная эрозия катода за время t .

Для оценки процесса формирования ИПС кроме удельной эрозии анода (Δ^a) и удельного привеса катода (Δ^k), суммарной эрозии анода ($\Sigma\Delta^a$) и суммарного привеса катода ($\Sigma\Delta^k$), коэффициента переноса материала K , с учетом отмеченных особенностей, используют следующие характеристики: t_x - порог хрупкого разрушения измененного слоя - время, которому соответствует первое отрицательное значение Δ^k или максимальное значение $\Sigma\Delta^k$; $t_{\text{кр}}$ - критический порог разрушения поверхностного слоя - время, которому соответствует нулевое значение общего привеса катода $M_k=0$ при $t \neq 0$. Эффективность процесса образования ИПС определяется: [221]

$$\gamma_{t_x} = \bar{K} \cdot t_x \cdot \sum_{t=0}^{t_x} \Delta_t^k, \quad (1.11)$$

где $\bar{K}$ - усредненный коэффициент переноса материала за период времени t_x .

Эффективность процесса образования измененной поверхности определяется по следующей зависимости:[221]

$$\gamma_{t_{\text{кр}}} = \bar{K} \cdot t_{\text{кр}} \cdot \sum_{t=0}^{t_{\text{кр}}} \Delta_t^k, \quad (1.12)$$

Последние две характеристики позволяют сравнивать материалы электродов по их влиянию на формирование измененного слоя.

Различные подходы к объяснению закономерностей формирования ЛС обусловлены ограниченностью объектов исследования и условий обработки. Для решения принципиального вопроса, можно ли создать условия ЭИЛ для получения слоёв требуемой толщины, необходимо провести исследования с использованием значительно более широкого круга объектов.

1.4. Формирование многослойных покрытий

При анализе публикаций, связанных с ЭИЛ, было выявлено что все исследования выполняются в основном для монослойных покрытий (легирование одним материалом электрода). Основными приемами, используемыми в получении многослойных покрытий с применением метода ЭИЛ являются:

1. Нанесение многослойных покрытий только методом ЭИЛ.
2. Нанесение комбинированных покрытий.

В первом случае, нанесение многослойных покрытий связано в основном с упрочнением (т.е. нет ориентации на восстановление.) режущего и штампового инструмента: двухслойные покрытия твердый сплав (феррохром) -(графит, меднографит, медь, хром), или графит -твердый сплав, чередование твердых сплавов [62, 63, 193-197]. Нанесение второго слоя также предназначается для снижения шероховатости [62], улучшения теплоотвода [196], повышение жаростойкости [194, 195], улучшения фрикционных свойств.

В работе [182] установлено, что предварительное легирование стальной подложки феррохромом позволяет увеличить коэффициент переноса сплава КХН25 в 1,5 раза и обеспечивает получение электроискрового покрытия, характеризующегося высокой сплошностью и однородностью.

Во втором случае для получения многослойных покрытий эффективной представляется комбинированная обработка, основанная на сочетании ЭИЛ с различными методами нанесения покрытий, такими как: химико-термическая обработка (ХТО), гальванические покрытия, покрытия нанесенные газоплазменным и плазменными методами, ионно-плазменным напылением, лазерной обработкой. [34, 166, 169].

Широко используется ЭИЛ в комбинации с поверхностным пластическим деформированием (ППД), алмазным выглаживанием, причем ППД может выполняться как до, так и после ЭИЛ [35, 40, 99, 118, 133, 146, 149, 152]. После «грубого» ЭИЛ предлагается тонкое точение легированного слоя с последующем выглаживанием. Вместо тонкого точения могут использоваться

также шлифование эластичными кругами, гидроабразивная обработка, шлифование алмазными лепестковыми кругами [37, 146, 164, 165].

Анализируя имеющуюся информацию можно сделать вывод о том, что проблему малой толщины наносимого методом ЭИЛ слоя (до 100 мкм), значительно сокращающей область применения ЭИЛ, можно решить 6 путями (рис.1.4.):

- применяя в качестве электродов материалы образующие неограниченные твердые растворы с железом (Cr, Ni, Co, Mo, V);

- применяя более инертную среду, в которой осуществляется легирование

- применяя установки ЭИЛ для электроискрового легирования на жестких режимах, в том числе и высокочастотные;

- применяя многослойные покрытия из материалов, образующих неограниченные твердые растворы с железом в сочетании с материалами, дающими

необходимые эксплуатационные характеристики поверхностного слоя (микротвердость, жаростойкость, коррозионостойкость, износостойкость и др.)

- применяя новые материалы, содержащие в себе элементы, дающими необходимые эксплуатационные характеристики поверхностного слоя (W, Ti и др.) и элементы, образующие неограниченные твердые растворы с железом.

Эти пути позволят поднять толщину наносимого слоя до 300-500 мкм (и выше), тем самым обеспечить припуск восстанавливаемых поверхностей деталей под дальнейшую механическую и отделочную обработки, с целью придания необходимой сплошности и шероховатости.

В соответствии с изложенным для проведения исследований можно рекомендовать следующие этапы:

1. Исследование особенностей формирования первого слоя покрытия при ЭИЛ в зависимости от энергетических параметров процесса при применении известных и новых материалов анода.

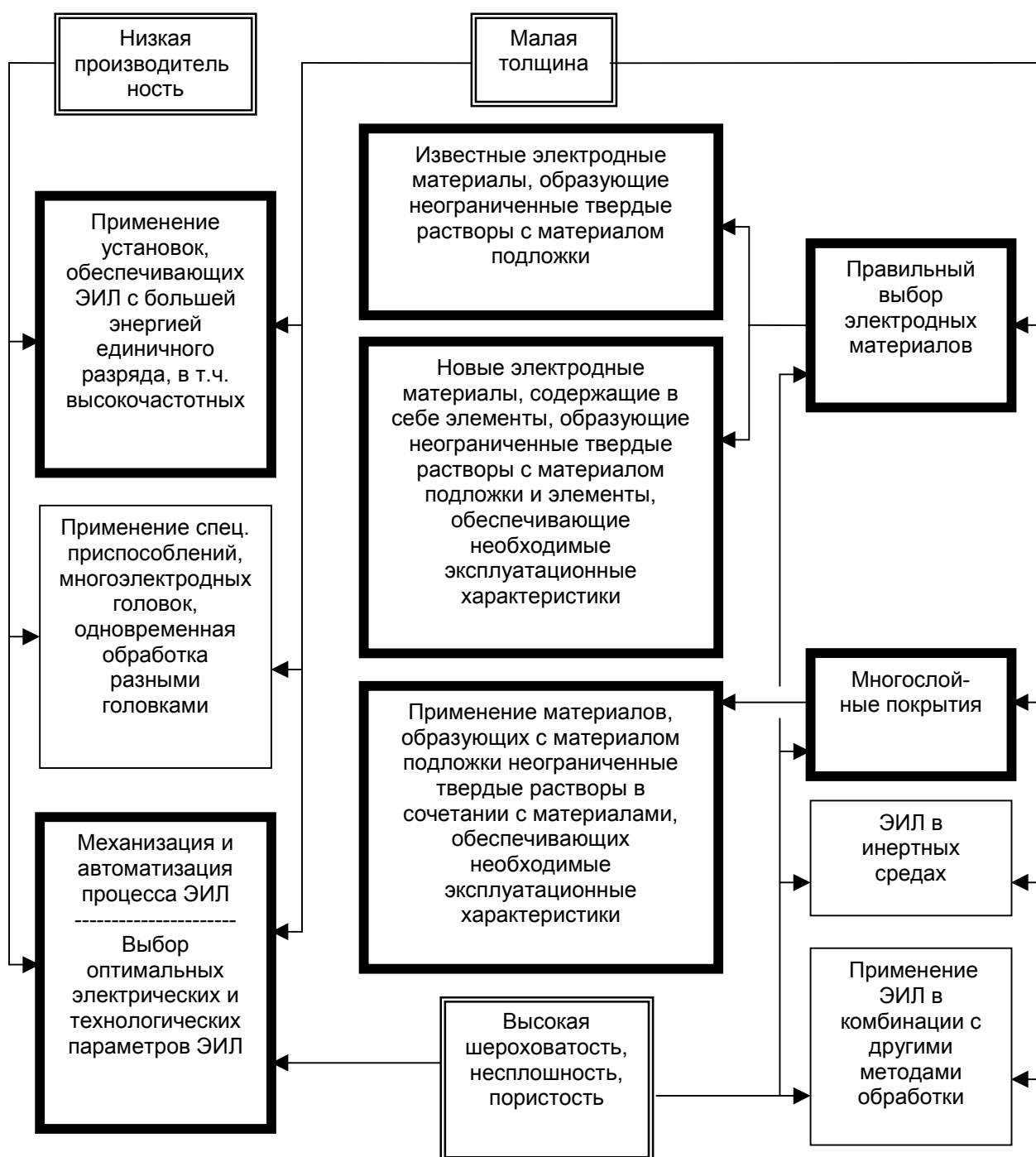


Рис.1.4. Пути решения проблем, сдерживающих широкое использование метода ЭИЛ для восстановления деталей машин

2. Исследование особенностей формирования последующих слоев на подложках с ранее образованными покрытиями электродами, влияние дефектов предыдущего покрытия и возможность их локализации дополнительной обработкой.
3. Определение и оценка критерия выбора материала (D_m), дополнительных методов обработки и предпочтительного ряда применения материала для многослойных покрытий.
4. Экспериментальная проверка подобранного ряда материалов и последовательности применения дополнительных (комбинированных) методов послойной обработки, исследование качества образуемых покрытий и эксплуатационных характеристик (износостойкость, жаростойкость и др.)

1.5. Физико-химические свойства легированного слоя

В процессе ЭИЛ поверхностный слой обрабатываемых металлов претерпевает структурные и базовые превращения, которые подробно изучены в работах Б.Р. Лазаренко и В.И. Лазаренко [3, 16], И.З. Могилевского, Л.С. Палатника [13] и других исследователей [14, 15]. Металлографические исследования, проведенные в работах многих авторов [17, 16, 18] показали, что упрочненная зона состоит из трех слоев. В процессе электроискрового легирования на поверхности катода возникает белый слой, который, как правило, не поддается травлению химреактивами, применяемыми для материала основы. Под белым слоем обычно расположен переходной слой, представляющий собой область термического влияния электрических импульсов и диффузионного взаимопроникновения элементов анода и катода. Ниже расположена область со структурой, присущей основному металлу подложки - катоду. В зависимости от используемых материалов электродов, энергии импульсов, длительности обработки возможно формирование более сложных структур, когда помимо белого слоя и переходного подслоя, возникают дополнительные зоны [19, 20].

Металлографический анализ поперечных срезов образцов из сталей и титана после ЭИЛ [61, 68, 156, 157] показывает, что поверхностный слой на

катоде представляет “белый” слой (БС), имеющий либо резкую границу с материалом основы, или переходную зону. Структура слоя, расположенного ниже “белого”, состоит из диффузионной зоны и зоны термического влияния (ЗТВ) [61, 143].

В литературе преимущественно описываются результаты металлографического анализа переходного слоя, в то время как структура “белого” слоя детально не изучалась. Это связано преимущественно с тем, что структура “белого” слоя не выявляется при воздействии соответствующих травителей. Образование “белых” слоёв связано с локальным действием высоких температур и давлений. [38, 124, 158, 159, 160, 142, 161], суммарным влиянием дефектов тонкой кристаллической структуры, дислокаций, вакансий и их комплексов, а также мартенситного превращения [124, 142, 162]. При ЭИЛ на процесс образования “белого” слоя должен влиять перенос материала анода на катод. Высокая скорость теплоотвода приводит к тому, что в пределах небольшого слоя, порядка несколько микрон, температура быстро падает до температур плавления и соответствующих фазовых превращений. В связи с этим кристаллизация, фазовые превращения, сопровождающие процесс ЭИЛ, приводят к образованию крайне неравновесных структур с очень мелким зерном, высокой гетерогенности по составу, структуре и свойствам. Считается, что слабая травимость “белого” слоя связана с его особым структурным состоянием [71, 163].

Фазовыми составляющими структуры слоя после ЭИЛ в основном являются: аустенит (реже феррит), нитриды, карбиды, карбонитриды и закалочные структуры (мартенсит, сорбит, тростит) [54]. Можно считать установленным, что в состав “белого” слоя входят элементы легирующего электродного материала и окружающей среды. Их содержание убывает по глубине слоя [21, 74, 81, 91], а общее содержание элементов в слое повышается с ростом мощности режима обработки.

Анализ имеющихся данных о структуре ЛС и условиях её формирования не даёт однозначного ответа на вопрос, представляет ли “белый” слой

неравновесную высокодисперсную структуру, образовавшуюся в результате импульсных тепловых и механических нагрузок, или это фазы аустенитно-мартенситного типа, характерные для термически обработанных структур. Если преобладающее влияние на структуру ЛС оказывает импульсные нагрузки, “белый” слой должен образовываться на любых токопроводящих материалах. Если же в процессе ЭИЛ поверхностные структуры формируются в основном за счёт теплового воздействия, то в этом случае БС должен образовываться преимущественно на металлах, склонных к термической обработке (Fe, Ti, Zr и их сплавы).

В литературе почти отсутствуют систематические исследования структуры поверхностного слоя при ЭИЛ компактными электродами из переходных металлов IV - VI групп и твёрдых сплавов, что отчасти связано с мелкодисперсностью структуры, затрудняющей её металлографический анализ. Для выяснения природы ЛС и улучшения условий его формирования необходимо комплексное изучение, включающее наряду с металлографическим, также электронномикроскопический, рентгенофазовый и микрорентгеноспектральный анализы слоя, полученного при различном сочетании материалов электродов и режимов обработки. Подобных сведений для поверхностных слоёв в литературе имеется мало.

Состав ЛС может значительно отличаться от состава исходных электродных материалов. Это вызывается рядом причин, главная из которых - специфика воздействия процесса ЭИЛ на электродные материалы: сверхвысокая скорость нагрева и охлаждения, контакт ювенильных поверхностей друг с другом и с элементами окружающей среды в условиях импульсного воздействия высоких температур и давлений, высокая скорость диффузионных процессов. [156,170].

Хотя действие искрового разряда очень кратковременно, в процессе ЭИЛ имеет место не только направленный перенос материала на подложку, но и активное перемещение атомов перенесённого материала в поверхностный слой подложки, сопровождающееся химическим взаимодействием материалов

электродов. Именно это обуславливает появление в БС метастабильных фаз (γ - железа, η - железа), присутствие окислов и нитридов при упрочнении на воздухе, образование пересыщенных твёрдых растворов [170,171].

Другой причиной отличия состава упрочнённого слоя от состава материалов легирующего и легируемого электродов может быть различная скорость эрозии структурных составляющих материалов электродов. Так, при легировании стали сплавом Т15К6 по данным рентгеноструктурного анализа в поверхностном слое обнаружены карбидные фазы вольфрама, сложный карбид на основе TiC и не обнаружен кобальт [156]. Возможно, более легкоплавкая составляющая твёрдого сплава интенсивнее эродирует с поверхности электродного материала через искровой промежуток.

Наконец, ещё одна причина состоит в том, что при прохождении через искровой промежуток электродный материал может диссоциировать, взаимодействовать с окружающей средой и, таким образом, изменять свои свойства [204]. Таким образом, специфические свойства БС, образующихся на легированных поверхностях, обусловлены как химико-термическим воздействием электрического разряда, так и направленным переносом материала анода на катод, их активным перемешиванием и химическим взаимодействием.

Отличие химического состава ЛС от состава исходных материалов электродов обуславливается контактом расплавленного материала анода с элементами межэлектродной среды, возможность термической диссоциации и разложения материала анода с последующим изменением химического состава, а также взаимодействием электродных материалов в процессе совместной кристаллизации с образованием новых химических соединений.

1.6. Электродные материалы используемые для ЭИЛ.

Анализ литературных данных [3-120] показал, что для ЭИЛ сталей применяются преимущественно сплавы типа ВК и ТК (табл. 1.1). Однако до последнего времени в литературе отсутствовали критерии выбора состава электродного материала из твёрдых сплавов, основанные на исследовании

взаимосвязи их состава, структуры и свойств. Единственным обоснованием выбора твёрдых сплавов является их повышенная твёрдость и износостойкость по сравнению с упрочняемым материалом. Хотя эти сплавы существенно отличаются по механическим характеристикам, химическому составу, структуре, тем не менее до начала работ Г.В. Самсонова, А.Д. Верхотурова, С.В. Николенко [21, 111, 227] никто из исследователей не акцентировал на этом внимание и не пытался установить взаимосвязь этих свойств, определяемых природой материала легирующего электрода, с условиями формирования легированного слоя и его характеристиками. Если критерий твёрдости легирующего электрода можно с большими ограничениями считать приемлемым для получения износостойких покрытий, то его использование применительно к покрытиям специального назначения (жаростойким, коррозионностойким и т.д.) непригодно. Кроме того, твёрдые сплавы на основе карбида вольфрама сравнительно неэффективны для ЭИЛ в связи с их высокой эрозионной стойкостью, а твёрдость легированного слоя, полученного при ЭИЛ твёрдыми сплавами в некоторых случаях может быть соизмерима с твёрдостью слоя, полученного ЭИЛ металлами и графитом.

В литературе имеются также сведения об использовании других электродных материалов для ЭИЛ - графита [45, 54, 59-65], феррохрома [46, 54, 55, 65, 3, 71-74], хрома [47, 49-58, 70], карбидов, боридов, нитридов титана, циркония, гафния и кремния [75-79, 112-117]. Однако эти сведения ограничены, отрывочны, не проанализированы в сравнении с данными для вольфрамовых твёрдых сплавов, и наконец, не содержат результатов изучения условий формирования ЛС и их взаимосвязи с параметрами процесса ЭИЛ. Применение самофлюсующихся и минеральных добавок в электродные материалы на основе тугоплавких соединений вольфрама и титана позволяют повысить износостойкость образуемых покрытий в 3-4 раза по сравнению с твёрдыми сплавами, но вместе с этим толщина образованных покрытий не позволяет их применять для восстановления деталей машин [111, 227].

Таблица 1.1

Электродные материалы, используемые при ЭИЛ металлических поверхностей [3-120]

Материал легирующего электрода	Материал катода	Назначение легированного слоя	Источник
Al	Al, Cu, стали Ст.3, У10А, ХВГ, ВТО	к., ж., и.	42, 43, 44, 45
Cu	Al, Cu, стали Ст.3, Х18Н10Т	к., м.о., э.к.	43, 46
Cr	Стали 30, 45, 40Х, У10А ХВГ, ВТ2, Cu	и., ж., р.и.	47, 49-58, 70
Графит	Стали Р18, 65Г, Т15К6	р.и., ш.о.	45, 54, 59-65
Mo, W	Стали 30, 45, У10А, ХВГ	и., к.	47, 51, 53, 54, 56, 65-69
Ag	Cu, Д16Г, 35ХН3Ф, ВТ6А	р.и., э.к.	47, 48
FeCr	Стали 35, 45, У8А, Х12М, 40Х, 4ХИ2С	и., м.о., р.и., ш.о	46, 54, 55, 65, 3, 71-74
TiC, TiB ₂	Стали У8А, Р18, Р6М5, 65Г, Fe	и., с.о.	75-79
бронзы БрБ2, БрАЖНЦ-9	Чугун, стали 45, Р18, Х12Ф1, 2Х13	и.	80-82
BK2	Стали 45, Р6М5, 5ХНТ	и., ш.о.	54, 65, 71, 79, 83
BK3	Стали 45, У7, 65Г, Р18, Р6М5, Т15К6	и., с.о., ш.о., р.и.	54, 60, 64, 65, 71, 62, 63
BK6, BK6М	Стали Ст.2, 45, У7, Р6М5	с.о., р.и.	86, 87
BK8	Стали 45, У7, 9ХС, У8, 40Х, 4ХГС, 1Х18Н9Т, Р6М3, Р6М5, Х12М	с.о., м.о., р.и.	81, 82, 86, 88-98
BK15	Стали У8, Р6М5	р.и., ш.о.	63, 64
T5K10	Стали 45, Р6М5, Р6М3	р.и., с.о.	80, 86, 97
T14K8	Сталь 2Х13	и.	82
T15K6	Стали 45, У7, У8, Р6М5, Р18, 9ХС, ХВГ, 1Х18Н9Т, 65Г, ВЖЛ-2, чугун	и., р.и., м.о., с.о.	55, 56, 62, 63, 65, 69, 72-74, 90, 92, 95, 98, 101-108
T30K4	Стали 15, У8, 40Х, Р18, Р6М5, Т15К6	р.и., с.о., м.о.	63-65, 3, 71, 74, 86, 109.
WC-Co-B	Сталь 45	р.и.	110
WC-Co-Ni ₃ Al, WC-Co-Ni-Cr-B-Si	Сталь 45	р.и, ш.о.	111, 119, 120
TiC-Ni-Mo-ДТК	Стали 45, Х12Ф1	р.и., ш.о.	112, 113
LaB ₆	Стали У8, Ст.3, Мо	р.и.	115, 116
TiN, ZrN, HfN, AlN, Si ₃ N ₄	Сталь 45, Ст.3, Мо	р.и.	114, 117
Условные обозначения легированного слоя: и. - повышение износостойкости, к. - повышение коррозионной стойкости, ж. - повышение жаростойкости, р.и. – повышение стойкости режущего инструмента, ш.о. - повышение стойкости штамповой оснастки, э.к. - повышение работоспособности электрических контактов, м.о. - повышение стойкости металлургического оборудования, с.о. - повышение стойкости сельскохозяйственного оборудования.			

При разработке критериев выбора и создания электродных материалов для образования покрытий с большей толщиной, необходимо исследование взаимосвязи физико-химических характеристик ЛС с параметрами процесса ЭИЛ - материалом электродной пары (анод - катод), режимом электроискровой обработки и составом межэлектродной среды.

1.7. Оборудование для ЭИЛ

Одной из основных задач внедрения процесса электроискрового легирования в производство является работа по совершенствованию электронных схем генераторов импульсов, проектированию и изготовлению эффективных установок для осуществления этого процесса.

В основу разработки новых конструкций установок определяются задачи повышения надежности и стабильности работы, уменьшение удельных энергозатрат на процесс, повышения производительности, мобильность, простота в обслуживании.

Большое значение в научно-исследовательском и практическом плане имеет механизация процесса электроискрового легирования, как переходной этап к автоматизации, позволяющая расширить технологические возможности этого способа, более объективно оценивать влияние электромеханических параметров установок на характеристики процесса и ранжировать их по степени значимости. Вопросам механизации и автоматизации процесса ЭИЛ посвящено в настоящее время большое число работ [178, 179, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192], в которых рассматриваются различные аспекты механизации процесса, их особенности и некоторые закономерности формирования упрочненных покрытий. Значительная часть этих работ посвящена выбору кинематической схемы ЭИЛ, выявлению закона движения электрода и детали, обоснованием требований для наибольшей производительности процесса при достижении требуемых качественных характеристик покрытий. Процесс электроискрового легирования является сложным физико-химическим процессом, протекающим при одновременном воздействии значительного числа переменных факторов. И.А. Чжен, А.А.

Золотов и другие авторы в своей работе [192] классифицируют эти факторы по группам:

1. факторы, определяющие электрические режимы обработки - напряжение источника питания МЭП, величина накопительного конденсатора, средний рабочий ток, ток короткого замыкания;
2. факторы, определяющие взаимное перемещение электродов, частота вращения легируемой детали, перемещение электрода вдоль обрабатываемой поверхности, число легирований одной детали, частота вращения электрода;
3. факторы, связанные с легирующим электродом - материал, сечение, длина, вид движения, температура рабочей поверхности;
4. элементы конструкции вращающегося электрода (для многоэлектродных вращающихся головок) - диаметр окружности расположения рабочей поверхности легирующих электродов, диаметр расположения осей поворота легирующих электродов, число легирующих электродов, контактное давление электродов на поверхность детали;
5. факторы, определяющие межэлектродную среду - химический состав, агрегатное состояние, давление.

При разработке, конструировании установок, исследовании процесса ЭИЛ необходимо учитывать воздействие всех перечисленных факторов, влияющих на эрозию обрабатывающего электрода, процессы переноса материала анода на катод, формирование легированного слоя.

В настоящее время технологический процесс ЭИЛ компактными электродами реализуется при применении универсальных установок с ручным управлением, механизированных и специальных установок (комплексов), относящихся к классу электромеханических устройств. Установки для ЭИЛ универсальные с ручным управлением комплектуются генератором импульсов электрического тока; вибратором; инструментами (электродами), которыми производится легирование, и приспособлениями для закрепления обрабатываемых деталей. Механизированные и автоматизированные установки (комплексы) состоят из следующих блоков: генераторов импульсов

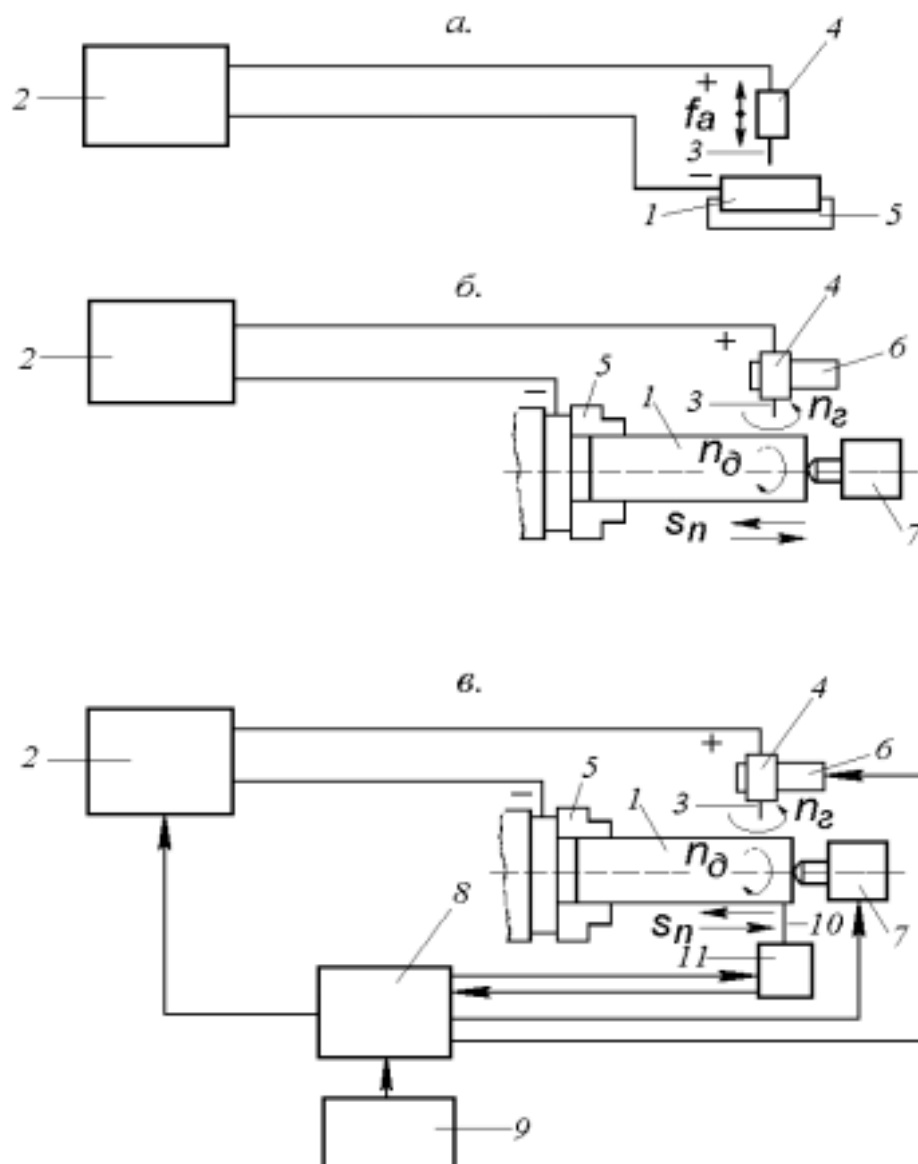
электрического тока с органами управления; головок одноэлектродных, многоэлектродных для закрепления электродов и передачи определенного движения относительно поверхности детали; набора инструментов (электродов); станков, в которые устанавливаются обрабатываемые детали и головки с электродами. Могут быть использованы универсальные станки, станки с ЧПУ, а также специальные станки. Кроме этого для автоматизированных комплексов необходимо наличие вычислительного комплекса с блоком управления генератором импульсов и механическими движениями электрода и детали, включающий банк данных по процессам ЭИЛ, и блок согласования сигналов, поступающих с датчиков контроля параметров качества образуемых покрытий, со входом в вычислительный комплекс.

На рис. 1.5 приведены основные схемы установок для ЭИЛ компактными электродами: а - с ручным управлением; б - механизированная установка для ЭИЛ (для обработки цилиндрической поверхности); в - автоматизированный комплекс для ЭИЛ (для обработки цилиндрической поверхности) [221].

Первые установки для ЭИЛ были разработаны и изготовлены в Центральной научно-исследовательской лаборатории электрической обработки материалов АН СССР (ЦНИЛ - ЭЛЕКТРОМ) под руководством авторов метода Б.Р.Лазаренко и Н.И.Лазаренко (1953г.). Генераторы были собраны по РС -- схеме, а коммутация разрядной цепи осуществлялась ручным вибрирующим электродом - инструментом.

Позднее в ЦНИИТМАШ были созданы установки моделей ЭАИ-1, ИЕ-2, ИЕ-2М, ИАС-2М, ИАС-3, особенностью которых являлось использование напряжений на электродах до 50 В с рабочим током до 30 А и значительной емкостью конденсаторных батарей [54].

С 1963г. в Институте прикладной физики АН МССР, директором которого стал Б.Р.Лазаренко, были разработаны установки для "чистового" и "грубого" электроискрового легирования типа ЭФИ. Опытный завод института выпускал установки небольшими партиями.



а - с ручным управлением,
 б - механизированная,
 в - автоматизированный комплекс

1 - обрабатываемая деталь (катод), 2 - генератор импульсов электрического тока, 3 - электрод (анод), 4 - устройство для закрепления электрода (вибратор, одно-, многоэлектродные головки), 5 - устройство для закрепления деталей (приспособления, патроны с центрами), 6 - блок управления движением устройства для закрепления электрода, 7 - блок управления движением детали, 8 - вычислительный комплекс с блоком управления генератором импульсов и механическими движениями электрода и детали, включающий банк данных по процессам ЭИЛ; 9, 10 - датчики контроля параметров качества образуемых покрытий, 11 - блок согласования сигналов датчиков с выходом в вычислительный комплекс.

Рис. 1.5 Основные схемы установок для ЭИЛ компактными электродами

Выпускаемые до последнего времени заводом установки для ЭИЛ с ручным управлением и механизированные типа "Элитрон" имеют широкий диапазон применения, мощности, технологических возможностей и параметров образования легированного слоя. Наиболее распространенные модели: Элитрон-16, Элитрон-22А, Элитрон-52Б.

Перспективность и экономическая эффективность применения процессов ЭИЛ подтверждается производством установок следующих моделей во всех промышленно развитых странах мира: Electroarc, Mold Doctor (США); Tucadur 2000, Eroleg (Германия); SNPM1 (Франция); Depozitron, SparkDepo mod.500, 300, 200, MicroDepo mod.100, 140, (Япония); Cosmeca A.G., Carbidor (Швейцария); Rocklinizer mod.500, mod.600, mod.1000 (Ю.Корея); D9105A, D9110A, D9130A (Китай); Duromatic (Венгрия); ARC1, ARC2, ARC3 (Индия), ЕЛФА (Болгария); ЭИЛВ-8 (Украина); UR-121, ВЕКТОР24NL (Россия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 89 993. Способ нанесения металлических покрытий. /Авт. изобр. Лазаренко Б.Р. Опубл. в Б.И., 1951, № 12.
2. Лазаренко Н.И. Изменение исходных свойств поверхности катода под действием электрических импульсов, протекающих в газовой среде. В сб.: Электроискровая обработка металлов, вып. 1, М.: изд. АН СССР, 1957.
3. Лазаренко Н.И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами. В кн.: Электроискровая обработка металлов. М.: Изд-во АН СССР. 1960. Вып. 2. С.56-66.
4. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. М.: изд. АН МССР, 1959.
5. Мицкевич М.К., Бушик А.И., Бакуто И.А., Шилов В.А. Изучение динамики процесса переноса материалов электродов в сильноточном импульсном разряде. Электронная обработка материалов, 1977, № 4.
6. Лазаренко Н.И. О механизме образования покрытия при электроискровом легировании металлических поверхностей. Электронная обработка материалов, 1965, № 1.
7. Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р. Электроискровое легирование металлических поверхностей. //Электронная обработка материалов. 1977. № 3. С.12 16.
8. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая эрозия металлов. М., Л.: Госэнергоиздат, 1944.
9. Золотых Б.Н., Мельдер Р.Р. Физические основы электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1977.
10. Золотых Б.Н. Основные вопросы качественной теории электроискровой обработки в жидкой диэлектрической среде. В кн.: Проблемы электрической обработки материалов. М.: изд. АН СССР, 1962.
11. Некрашевич И.Г., Бакуто И.А. Механизм эрозии металлов при электрическом импульсном разряде. В кн.: Сборник научных трудов ФТИ АН БССР, вып.6, Минск: изд. АН БССР, 1960.
12. Некрашевич И.Г., Бакуто И.А. К вопросу о современном состоянии теоретических представлений об электрической эрозии металлов. В кн.: Электроискровая обработка металлов, М.: изд. АН СССР, 1963.

13. Палатник Л. С. Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий. ДАН СССР, 1935. Т.89, № 3, с. 455 - 433.
14. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев: Наукова думка, 1976.
15. Михайлов В.В. Исследование особенностей электроискрового легирования титана и его сплавов. Кандидатская диссертация Кишинев: ИПФ АН МССР, 1976.
16. Лазаренко Н.И. Современный уровень и перспективы развития электроискрового легирования металлических поверхностей. Электронная обработка материалов, 1967, № 5
17. Верхотуров А.Д. Исследование закономерностей процесса электроискрового легирования поверхности тугоплавкими металлами и их соединениями. Кандидатская диссертация, Киев: ИПМ АН УССР, 1971.
18. Сычев В.С. Исследование электроискрового легирования переходных металлов 1У - У1 групп тугоплавкими боридами. Кандидатская диссертация, Киев: ИПМ АН УССР, 1973.
19. Могилевский И.З., Чеповая С.А. Металлографические исследования поверхностного слоя стали после электроискровой обработки. В сб.: Электроискровая обработка металлов, вып.1 М.: изд. АН СССР, 1957.
20. Петров Ю.Н., Сафронов И.И., Келоглу Ю.П. Структурные изменения металла после электроискрового легирования. Электронная обработка материалов, 1965, № 2.
21. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычѳв В.С. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев: Наукова думка. 1976. 220 с.
22. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Самсонов Г.В. и др. Зависимость эрозии анода от состояния упрочняемой поверхности при электроискровом легировании.// Электронная обработка материалов. 1970. №6. С. 29-31.
23. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. М.: Изд-во Наука. 1988. 224 с.
24. Золотых Б.Н. Основные вопросы теории электроискровой эрозии в импульсном разряде в жидкой диэлектрической среде. Автореферат докторской дис. М.: МИЭМ. 1968. 52 с.

25. Золотых Б.Н. О физической природе электроискровой обработки металлов. В кн. Электроискровая обработка металлов. Выпуск 1. Изд-во АН СССР. М. 1957. С. 38-69.
26. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. - Владивосток: Дальнаука, 1995. - 323 с.
27. Верхотуров А.Д. Обобщенная модель процесса электроискрового легирования. // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1983. №1. С. 3-6.
28. Лазаренко Б.Р. Физические основы электроискровой обработки металлов. // Вестник АН СССР. 1959. №6. С. 49-56.
29. Верхотуров А.Д., Драчинский А.С., Подчерняева И.А. и др. О физической природе эрозии и формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании молибдена пористыми электродами железа. // Порошковая металлургия. 1983. №12. С. 51-54.
30. Верхотуров А.Д. Эрозионная стойкость тугоплавких металлов. Электронное строение и физико-химические свойства тугоплавких металлов и соединений. К.: "Наукова думка". 1980. С. 37-43.
31. А.с. 69315 СССР. Кл. 48 а, 11 Способ нанесения металлических покрытий на алюминий и его сплавы/ Б.А. Красюк, В.А. Щиплецов// Свод изобретений СССР. 1947. №9. с. 329.
32. А.с. 105669 СССР. Кл. 48 в, 13. Способ упрочнения поверхностей и восстановления размеров изделий и инструментов/ С.Е. Шульман, Л.С. Палатник, Б.А. Севрук// Открытия. Изобретения. 1957. №6. с. 105.
33. Самсонов Г.В., Прядко Л.Ф., Прядко И.Ф. Электронная локализация в твердом теле. М.: "Наука". 1976. 315 с.
34. М.Э. Бутовский. Нанесение покрытий и упрочнение материалов концентрированными потоками энергии. Часть 1,2. -Учебное пособие- М.: ИКФ "Каталог", 1998.
35. Н.В. Шушура, А.Н. Гадицкий. Электрокомбинированное поверхностное упрочнение деталей прессформ// Технология и организация производства. 1990. №4. с. 13-15.
36. Пилянкевич А.Н., Падерно В.Н., Верхотуров А.Д. и др. Исследование структуры поверхности электродов при электроискровом легировании титанового сплава ВТ-18 никелем. // Электронная обработка материалов. 1982. №5. С.30-35.

37. А.с. 1653921 СССР. МКИ В23Н 9/900. Способ обработки деталей/ А.Е. Проволоцкий, В.Н. Морозенко, С.П. Лапшин и др.// Открытия. Изобретения. 1991. №21. с. 55.
38. Костецкий Б.И., Носовицкий И.Г., Караулов А.К. и др. Поверхностная прочность материалов при трении. К.: Техника. 1976. 300 с.
39. Ливурдов В.И., Снежков В.А., Поликарпова А.П. и др. Качество поверхностного слоя сталей после электроискрового легирования с использованием генераторов независимых импульсов. // Электронная обработка материалов. 1984. №4. С. 18-20.
40. Бойцов А.Г., Хворостухин Л.А., Ефимов И.В. Комбинированное электроэрозионное упрочнение// Ресурсосберегающие технологии машиностроения. Сб. научных трудов Межвузовской научно-технической программы. М.: МАМИ. с. 205-208.
41. Лазаренко Н.И. Электроискровое легирование металлических поверхностей. М.: Машиностроение. 1976. С. 44.
42. Косаренко Н.Н., Жура В.И., Юхненко В.В. Особенности эрозии электродов из одноименных металлов при ЭИЛ. // Электронная обработка материалов. 1981. №6. С. 28-30.
43. Жура В.И., Лапшин С.П., Юхненко В.В. К вопросу эрозии электродов при ЭИЛ. // Электронная обработка материалов. 1981. №5. 19-21.
44. Лазаренко Б.Р., Гитлевич А.Е., Фурсов С.П. и др. Некоторые особенности легирования титана алюминием и никелем. // Электронная обработка материалов. 1974. №1. С. 29-32.
45. Тимошенко Б.И., Ермоленко Д.З., Песоцкий В.И. и др. Исследование напряженного состояния упрочненного слоя деталей после электроискрового легирования. // Электронная обработка материалов. 1976. №4. С. 18-20.
46. Коробейник В.Ф., Жеребцов В.Н., Щекин В.М. Электроискровое восстановление рабочей поверхности прокатных валков. // Электронная обработка материалов. 1981. №6. С. 40-43.
47. Михайлов В.В., Абрамчук А.П. Особенности электроискрового легирования алюминия и его сплавов. // Электронная обработка материалов. 1986. №2. С. 36-41.
48. Ревуцкий В.М., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В. Исследование распределения элементов в электроискровых покрытиях с помощью радиоактивных изотопов. // Электронная обработка материалов. 1981. №6. С. 32-35.

49. Дубовицкая Н.В., Коленченко Л. Д., Снежков В.А. Изменение фазового состава в поверхностных слоях стали 45 при электроискровом легировании хромом. // Электронная обработка материалов. 1987. №3. С. 21-25.
50. Абрамчук А.П., Михайлов В.В., Полищук Д.Ф. и др. Распределение элементов в поверхностных слоях алюминия при электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов. 1988. №6. С.12.
51. Верхотуров А.Д. Особенности эрозии переходных металлов при электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов. 1981. №6. С. 18-21.
52. Ларионов Л.Н., Дубовицкая Н.В. Структурные изменения в приповерхностных слоях стали 45 при электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов. 1981. №6. С. 22-24.
53. Парканский Н.Я., Кац М.С., Гольдинер М.Г. и др. Кинетика разрушения покрытий при электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов. 1982. №3. С. 20-23.
54. Иванов Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. М.: Машгиз. 1961. 303 с.
55. Дехтярь Л.И., Игнатьков Д.А., Коваль Н.П. и др. Влияние электроискрового легирования на усталостную прочность валов. // Электронная обработка материалов. 1974. №3. С. 32-36.
56. Дехтярь Л.И., Зильберман Б.В., Коваль Н.П. и др. Характеристики упругости материалов, легированных электроискровым способом. // Электронная обработка материалов. 1974. №5. С. 37-40.
57. Снежков В.А., Полоскин Ю.В., Лазаренко Н.И. Восстановление эксплуатационных свойств деталей при капитальном ремонте. // Электронная обработка материалов. 1977. №3. С. 83-86.
58. Чатынян Л.А., Лазаренко Н.И. Повышение износостойкости поверхностей трения, работающих при высоких температурах, электроискровым легированием. // Электронная обработка материалов. 1966. №2. С. 33-38.
59. Михайлюк А.И., Гитлевич А.Е., Иванов А.И. и др. Превращения в поверхностных слоях сплавов железа при электроискровом легировании графитом. // Электронная обработка материалов. 1986. №4. С. 23-27.
60. Петров Ю.Н., Сафронов Н.И., Фурсов С.П. Электроискровой способ повышения долговечности режущих элементов сельскохозяйственных машин. // Электронная обработка материалов. 1965. №1. С.54.

61. Могилевский И.З., Чеповая С.А. Металлографическое исследование поверхностного слоя стали после электроискровой обработки. В кн.: Электроискровая обработка металлов. М.: Изд-во АН СССР. Выпуск 1. 1957. С. 95-116.
62. Романенко А.А., Яценко Н.Н., Кудря Г.А. Особенности электроискрового упрочнения. // Технология и организация производства. 1977. №3 С. 52-54.
63. Лемехов Г.К., Перпери М.М. Повышение стойкости инструмента и технической оснастки электроискровым легированием. // Технология и организация производства. 1978. №3. С. 51-52.
64. Лемехов Г.К., Нерзнер В.А., Перпери М.М. Применение метода электроискрового легирования инструмента на некоторых заводах Министерства тракторного и сельскохозяйственного машиностроения. // Электронная обработка материалов. 1977. №4. С. 90-91.
65. Сафронов И.И., Фурсов С.П., Парамонов А.М. и др. Исследование влияния материала электрода на формирование микроструктуры и микротвердости легированного слоя. // Известия АН СССР, серия физ.тех. и мат. наук. 1977. №1. С. 66-70.
66. Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д. Влияние межэлектродной среды на эрозию материала анода при электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов. 1974. №1. С. 33-35.
67. Самсонов Г.В., Пилянкевич А.Н., Верхотуров А.Д. Исследование структуры и некоторых свойств упрочнённых слоёв при электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов. 1973. №4. С. 21-24.
68. Лазаренко Н.И. Изменение исходных свойств поверхностей катода под действием искровых электрических импульсов, протекающих в газовой среде. В сб. Электроискровая обработка металлов. Вып.1. Изд-во АН СССР. М., 1957. С. 70-94.
69. Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р., Бакал С.З. Некоторые особенности процесса электроискрового легирования металлических поверхностей в вакууме. // Электронная обработка материалов. 1969. №4. С. 27-30.
70. Безбах Н.В., Дубовицкая Н.В., Коленченко Л.Д. Влияние температуры стальной подложки при электроискровом легировании хромом на изменение структуры и усталостной прочности. // Электронная обработка материалов. 1989. №1. С. 20-23.
71. Прошин Г.А. Электроискровая обработка деталей машин. Киев Москва: Машгиз. 1956. 111 с.

72. Андреев В.И., Морозенко В.Н., Тимошенко Б.И. Повышение стойкости деталей электроискровым легированием. // Вестник машиностроения. 1971. №8. С. 85-88.
73. Морозенко В.Н., Романенко Е.А., Пилипенко Р.И. и др. Повышение износостойкости валков трубоэлектросварочных агрегатов. // Технология и организация производства. 1973. №2. С. 41-43.
74. Андреев В.И., Морозенко В.Н., Беда Н.И. и др. Электроискровое легирование деталей, работающих в условиях термоциклического нагружения. // Электронная обработка материалов. 1973. №2. С. 23-25.
75. Горяев Ю.Н., Симан Н.И., Смолин М.Д. Влияние электроискрового легирования поверхности молибдена и ниобия на термоэлектронную эмиссию. // Электронная обработка материалов. 1987. №4. С. 12-15.
76. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Егоров Ф.Ф. и др. Электроискровое легирование стали карбидом титана в области гомогенности. // Порошковая металлургия. 1982. №2. С. 37-39.
77. Бовкун Г.А., Владкова З.И., Моляр В.Н. Исследование упрочнения сталей при локальном электроискровом нанесении карбидов переходных металлов. // Электронная обработка материалов. 1988. №1. С. 10.
78. Верхотуров А.Д., Горячев Ю.М., Ипполитов Е.Г. Электронная природа взаимодействия материалов при электроискровом легировании железа карбидами. // Порошковая металлургия. 1985. №12. С. 55-58.
79. Артамонов А.Я., Бовкун Г.А., Казаченко Н.В. и др. Повышение износостойкости лёгких сплавов. // Порошковая металлургия. 1968. №8. С. 91-94.
80. Авсиевич О.И. Применение электроискрового упрочнения для повышения износоустойчивости поверхностных слоёв чугунных деталей, работающих на истирание. В кн.: Электроискровая обработка металлов. М. : Изд-во АН СССР. 1963. С. 139-141.
81. Морозенко В.Н., Онуфриенко И.П., Гасик Л.И. и др. Получение полиметаллических композиций электроискровым способом. // Электронная обработка материалов. 1972. №4. С. 8-12.
82. Онуфриенко И.П., Юхненков В.В. и др. О некоторых особенностях оценки поверхностей деталей, легированных электроискровым способом. // Электронная обработка материалов. 1975. №6. С. 25-27.
83. Верхотуров А.Д., Кириленко С.Н., Полищук И.Е. Влияние термической обработки стали 45 на свойства её поверхностного слоя после

- электроискрового легирования (ЭИЛ) твердым сплавом. // Электронная обработка материалов. 1982. №4. С. 23-25.
84. Романенко А.А., Яценко И.И., Кудря Г.А. Особенности электроискрового упрочнения // Технология и организация производства. 1977. №3. С. 52-54.
 85. Лемехов Г.К., Перпери М.М. Повышение стойкости инструмента и техоснастки электроискровым легированием. // Технология и организация производства. 1978. №3. С. 51-52.
 86. Полянченко А.В. Электроискровое упрочнение деталей машин. // Вестник машиностроения. 1954. №7. С. 65-70.
 87. Федюнин В.Ф., Труш Н.А., Дмитриев П.А. Применение электроискрового упрочнения инструментов из быстрорежущих сталей. // Технология и организация производства. 1975. №9. С. 54-55.
 88. Фрейдлин М.Г., Бродская Р.М., Легкодух А.М. Структурные особенности слоёв, полученных при электроискровом легировании (ЭИЛ) титановых сплавов. // Электронная обработка материалов. 1986. №2. С. 26-28.
 89. Плескач В.М., Аверченко П.А. Электроискровое легирование сплавами Т5К10 и ВК8 с целью повышения износостойкости. // Электронная обработка материалов. 1979. №2. С. 37-39.
 90. Бушлин А.П., Плёткин М.И., Никитченко В.Г. и др. Повышение износостойкости сталей электроискровым легированием. // Электронная обработка материалов. 1981. №6. С. 37-40.
 91. Морозенко В.Н., Назарец В.С., Тимошенко Б.И. и др. Термосиловое действие электрического разряда при электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов. 1973. №4. С. 24-26.
 92. Коваль Н.Н., Сафронов И.И. Влияние поверхностно пластической деформации на некоторые пластические свойства поверхности, упрочненной электроискровым способом. // Электронная обработка материалов. 1973. №5. С. 87-89.
 93. Андреев В.И., Беда Н.И., Гинзбург Б.И. и др. Электроискровое упрочнение инструмента для резки облоя на периодическом прокате. // Электронная обработка материалов. 1973. №3. С. 24-25.
 94. Андреев В.И., Деревянко В.И., Беда Н.И. и др. Повышение долговечности деталей при повторном электроискровом легировании. // Электронная обработка материалов. 1975. №1. С. 84-85.

95. Федюкин В.Ф., Труш И.А., Дмитриев П.А. Применение электроискрового упрочнения инструментов из быстрорежущих сталей. // Технология и организация производства. 1975. №9. С. 54-55.
96. Деревянко В.И., Андреев В.И., Беда Н.И. и др. Электроискровое упрочнение деталей роторным многоэлектродным инструментом. // Технология и организация производства. 1976. №1. С. 44-45.
97. Тимошенко Б.И., Ермоленко Д.З., Песоцкий В.И. Упрочнение деталей электрокомбинированным методом. // Электронная обработка материалов. 1977. №4. С. 82-84.
98. Иванов В.И., Коваль Н.П., Базылько А.П. Опыт применения электроискрового легирования для упрочнения инструментов и восстановления деталей машин. // Электронная обработка материалов. 1977. №4. С. 84-88.
99. А.с. 1657307 СССР. МКИ В 23Н 9/00. Способ упрочнения поверхностей изделий из титановых сплавов/ М.Г. Фрейдлин, А.М. Легкодух, А.Л. Гавзе и др.// Открытия. Изобретения. 1991. №23. с. 37
100. Трофимов В.И., Розанов В.А. Автоматизация процесса электроискрового легирования сложных металлических поверхностей. // Электронная обработка материалов. 1972. №1. С. 42-46.
101. Добында И.В., Парамонов А.М., Семенчук А.В. и др. Электроискровое легирование двухкоординатным вибратором. // Электронная обработка материалов. 1976. №6. С. 26-28.
102. Палатник Л.С., Коган Н.И., Фатьянова Н.Б. и др. Влияние электроискрового легирования на стабильность размеров и физических свойств сплава 40ХНЮ. // Электронная обработка материалов. 1977. №4. С. 38-42.
103. Хабибулина Н.В., Плешкова Е.В. Электроискровое легирование медицинских инструментов. // Электронная обработка материалов. 1977. №3. С. 37-38.
104. Разумов В.П., Еган О.М. Некоторые особенности механизации процесса электроискрового легирования. // Электронная обработка материалов. 1977. №4. С. 22-24.
105. Бугаев А.А., Перевертун А.И., Скороход В.А. и др. Некоторые закономерности механизированного легирования. // Электронная обработка материалов. 1977ю №3. С. 20-23.
106. Фурсов С.П., Парамонов А.М., Добында И.В. и др. Источники питания для электроискрового легирования. Кишенёв: Изд-во "Штиинца" 1978. 118 с.

107. Лазаренко Б.Р., Михайлов В.В., Гитлевич А.Е. и др. Лазерное воздействие на покрытия, полученные методом электроискрового легирования. // Электронная обработка материалов. 1978. №3. С. 24-25.
108. Андреев В.И. Способы электроискрового упрочнения деталей. // Технология и организация производства. 1979. №4. С. 32-35.
109. Трофимов В.И. Влияние жесткости внешней характеристики источника тока на процесс электроискрового легирования. // Электронная обработка материалов. 1972. №4. С. 31-34.
110. Муха И.М., Верхотуров А.Д., Гнедова С. В. Материал легирующих электродов на основе твёрдых сплавов WC-Co с микродобавками бора. // Электронная обработка материалов. 1981. №5. С. 24-27.
111. Верхотуров А.Д., Шевелёва Т.А., Николенко С.В., Столярова Н.С. Влияние самофлюсующихся добавок в электродные материалы WC-Co на процесс формирования поверхностного слоя и его свойства при электроискровом легировании сталей. // Электронная обработка материалов. 1990. №2. С. 25-29.
112. Шевелёва Т.А., Верхотуров А.Д., Николенко С.В. и др. Влияние добавок датолитового концентрата в электродные материалы TiC-Ni-Mo на свойства поверхностного слоя сталей после электроискрового легирования. // Электронная обработка материалов. 1991. №1. С. 26-30.
113. Шевелёва Т.А., Верхотуров А.Д., Николенко С.В. и др. Влияние добавок датолитового концентрата в электродные материалы TiC-Ni-Mo на свойства поверхностного слоя сталей после электроискрового легирования. Препринт. Черноголовка. 1990. 17 с.
114. Верхотуров А.Д., Ковальченко М.С., Кириленко С.Н. Особенности формирования упрочненного слоя при электроискровом легировании нитридами переходных металлов 1У группы. // Электронная обработка материалов. 1981. №5. С. 21-25.
115. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А. и др. Исследование возможности электроискрового легирования (ЭИЛ) стали гексаборидом лантана. // Электронная обработка материалов. 1982. №1. С. 23-26.
116. Подчерняева И.А., Симан Н.И., Верхотуров А.Д. и др. Эмиссионные электроискровые покрытия на основе гексаборида лантана. // Порошковая металлургия. 1984. №2. С. 50-53.
117. Абрамчук А.П., Бовкун Г.А., Михайлов В.В. Трение и износ покрытий, полученных электроискровым упрочнением поверхности сплава АЛ-25

тугоплавкими соединениями. // Электронная обработка материалов. 1989. №1. С. 17-20.

118. А.с. 1700064 СССР. МКИ С2107/00, GOI № 3/56. Способ получения износостойкой и задиристой поверхности/ Н.Н. Натаров, Л.С. Рапопорт// Открытия. Изобретения. 1991. №47 с. 105.
119. Верхотуров А.Д., Николенко С.В., Муха И.М., Шушунов В.Н. Электродный материал на основе карбида вольфрама для электроэрозионного нанесения покрытий. А.С. №1496292, заявка №4358267 от 4.01.88. (не публикуемое).
120. Верхотуров А.Д., Николенко С.В., Муха И.М., Шушунов В.Н. Электродный материал на основе карбида вольфрама для электроэрозионного нанесения покрытий. А.С. №1510388, заявка №4373168 от 8.02.88. (не публикуемое).
121. Лазаренко Б.Р. Некоторые научные проблемы электрической эрозии материалов. //Электронная обработка материалов. 1969. №2.С.7-11
122. Золотых Б.Н., Круглов А.И. Тепловые процессы на поверхности электродов при электроискровой обработке металлов. В кн.: Проблемы электрической обработки материалов. М.: Изд-во АН СССР. 1960. С. 65-85.
123. Стекольников И.С. Исследование начальной стадии разряда при очень малых межэлектродных промежутках. // Известия АН СССР. №7. С. 985-994.
124. Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А. Основы электронно лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение. 1978. 239 с.
125. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электрическая теория искровой электрической эрозии металлов. В кн.: Проблемы электрической обработки материалов. М.: Изд-во АН СССР . 1962. С. 44-51.
126. Лазаренко Б.Р., Городекин Д.И. Краснолоб К.Я. Динамическая теория выброса материала электрода коротким электрическим импульсом и закономерности образования ударных кратеров. // Электронная обработка метериалов. 1969. №2. С. 18-23.
127. Золотых Б.Н. Физические основы электроискровой обработки металлов. М.: Гостехтеориздат. 1953.
128. Золотых Б.Н., Гиоев К.Х. Роль факелов импульсного разряда в передаче энергии и эрозии электродов. В кн.: Физические основы электроискровой обработки материалов.М.: Наука. 1966. С 16-31.

129. Золотых Б.Н. Электроискровой контактный способ упрочнения металлических поверхностей. М.,Л.: Госэнергоиздат, 1951.
130. Золотых Б.Н., Коробова И.П., Стрыгин Э.М. О роли механических факторов в процессе эрозии в импульсном разряде. В сб.: Физические основы электроискровой обработки. М.: Изд-во "Наука". 1966. С. 63-73.
131. Верхотуров А.Д. Физико-химические основы эрозии материалов при электроискровом легировании. Владивосток: Препринт. Институт машиноведения и металлургии ДВО АН СССР. 1991. 66 с.
132. Верхотуров А.Д. Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. Владивосток. "Дальнаука". 1992. 175 с.
133. А.с. 833424 СССР. МКИ В23Р 1/18. Способ нанесения покрытий/ В.В. Ермилов, Д.Б. Меремс// Открытия. Изобретения. 1981. №20. с. 34.
134. Раховский в.и., Ягудаев Я.М. К вопросу о механизме разрушения электродов в импульсном разряде в вакууме. // ЖТФ. 1969. т. 39. № 2. С. 317-320.
135. Williams E.M. Theory of Electric spark machining. "Electrical Engineering". 1952. V/ 71. p. 257-262.
136. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Физика искрового способа обработки металлов. М.: ЦБТИ МЭП СССР. 1946. 76 с.
137. Лазаренко Н.И. А.С. №89933 (СССР). Способ нанесения металлических покрытий. "Бюл. изобр.". 1951. №12.
138. Лазаренко Н.И., Лазаренко Б.Р. А.С. №70651 (СССР). Устройство для нанесения покрытий из металлов и сплавов. "Бюл. изобр.". 1964. №22.
139. Волченкова Р.А. Связь между теплосодержанием и физико-механическими и эрозионными характеристиками металлов. // Электронная обработка материалов. 1973. №4. С. 58-62.
140. Скорчеллетти В.В. Теоретическая электрохимия. Л.: "Химия". 1974. 56 с.
141. Афанасьев П.В. О связи между величиной электрической эрозии и физическими константами металлов. В кн.: Сборник трудов Белорусского политехнического института. 1955. Вып.49.
142. Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головкин Л.Ф., Подчерняева И.А. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. М.: "Наука". 1986. 277 с.

143. Сафронов И.И. Исследование возможности применения карбидных и боридных соединений титана, ниобия, циркония и хрома в качестве электродов для электроискрового легирования. К.: ИПМ АН УССР. Автореферат канд. дис. 1967. 26 с.
144. Самсонов Г.В., Лемешко А.Н. Закономерности электроискрового разрушения тугоплавких металлов с углеродом, бором. // Электронная обработка материалов. 1969. №6. С. 3-6.
145. Альбински К. Исследование эрозионной устойчивости рабочих электродов при электроискровой и электроимпульсной обработке. //Станки и инструменты. 1964. №7 С. 11-13.
146. Е.А. Памфилов, Н.М. Петренко, Т.А. Михеенко. Формирование качества поверхностей при электроискровом упрочнении// Технологическое обеспечение функциональных параметров качества поверхностного слоя деталей машин. Сб. научных трудов.-Брянск. БИТМ. 1987. с. 82-84.
147. Мицкевич М.К., Бакуто И.А. Электроискровой способ нанесения локальных тостоотенных покрытий. // Электронная обработка материалов. 1977. №4. С. 28-31.
148. Мицкевич М.К. и др. А.С.№557899 (СССР). Устройство для электроискрового нанесения покрытий. Оpubл. в Б.И. 15.05.1977.
149. А.А. Ершов, А.В. Никифоров, В.И. Ливурдов. Применение электроискрового легирования для реализации алмазного выглаживания титана// Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1982. №3. с. 6-8.
150. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровая обработка токопроводящих материалов. М.: Изд-во АН СССР. 1958. 183 с.
151. Стоянов В.Н. Ремонт деталей электроискровым способом. В кн.:Ремонт автомобильных деталей. М.: “Машгиз”.1954. С. 72-83.
152. А.с. 1798070 СССР. МКИ 23Н 9/00. Способ изготовления поверхностей трения/ В.И. Ливурдов, В.А. Снежков, А.Г. Бойцов, Л.А. Хворостухин// Открытия. Изобретения. 1993. №8. с. 46.
153. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев: Штиинца, 1985.
154. Антошко В.Я., Гитлевич А.Е., Коваль Н.П. К вопросу ограничения толщины упрочненного слоя при электроискровом легировании. Электронная обработка материалов, 1975, № 4.

155. Верхотуров А.Д., Муха И.М. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. Киев: "Техника", 1982. 188 с.
156. Золотых Б.Н. Электроискровой контактный способ упрочнения металлических поверхностей. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1951. 55 с.
157. Могилевский И.З. Структурные изменения в железе и стали после электроискровой обработки поверхности графитом. В сб.: Проблемы электрической обработки материалов. М.: Изд-во АН СССР. 1960. С. 86-97.
158. Самсонов Г.В., Ковтун В.И., Тимофеева И.И. и др. Природа высокой микротвердости поверхностей, упрочненных трением. // Физико-химическая механика материалов. 1973. №4. С. 26-30.
159. Миндюк А.К., Бабей Ю.К., Выговский И.П. О природе и свойствах белых слоев. // Физ.-хим. механика мат-ов. 1974. №9. С. 81-84.
160. Голубец В.М. Влияние белого слоя на износостойкость деталей машин. Автореф. кандидат. дис. К.: ИПМ АН УССР. 1973. 40 с.
161. Кришталл М.А., Жуков А.А., Кокора А.Н. Структура и свойства сплавов, обработанных излучением лазера. М.: Металлургия. 1973. 192 с.
162. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М.: Машиностроение. 1975. 296 с.
163. Нижник С.Б. Отпуск вторичных структур углеродистой стали, образованных при сверхскоростном действии высоких температур и давлений // Физика металлов и металловедение. 1960. Т.13. №6. С. 879-886.
164. А.с. 1259147 СССР. МКИ G01 № 3/56. Способ получения износостойкой поверхности/ Е.А. Памфилов, Н.М. Петренко, В.В. Подкидышев// Открытия. Изобретения. 1986. №35. с. 165.
165. А.с. 1553296 СССР. МКИ B23H 5/04. Способ абразивного шлифования/ В.Д. Дорофеев, В.А. Славин, Д.В. Бураков, Н.В. Фунтов// Открытия. Изобретения. 1990. №12. с. 58.
166. Joining of ceramic to metal by use of electric discharge machined surface/ Jino Y., Taramon T., Mohn M., and others// J. Mater. Sci. lett. 1989. 8. № 4. p. 491-495.
167. Петров Ю.Н., Сафонов И.И., Келоглу Ю.П. Структурные изменения металла после электроискрового легирования. // Электронная обработка материалов. 1965. №2. С. 29-34.

168. Памфилов Е.А., Петренко Н.М. Эластичное шлифование поверхностей, упрочненных электроискровым методом// Технология автомобилестроения. 1982. №9. с. 18-20.
169. Паустовский А.В., Ботвинко В.П. Влияние импульсного лазерного излучения на структуру и свойства электроискровых покрытий из сплавов типа ВК и ТК// Порошковая металлургия. 1991. №2. с. 55-57.
170. Сафронов И.И. Структура поверхностного слоя после электроискрового легирования стали. // Известия АН СССР. Серия физ.-тех. и мат. наук. 1964. №5. С. 30-35.
171. Goldshmidt M.I. The constitution of spark treated metals. Iron and steel. 1959. p. 469-471.
172. Верхотуров А.Д., Парамонов А.М., Бондарь В.Т. Влияние частоты импульсного тока на формирование упрочненного слоя при электроискровом легировании. Порошковая металлургия, 1980, № 7.
173. Мулин Ю.И., Верхотуров А.Д., Гостищев В.В. Получение электродов для электроискрового легирования из шеелитового концентрата при применении метода металлотермии // Электронная обработка материалов. 1994, № 5, с. 70-73.
174. Лякишев Н.П., Плинер Ю.Л., Игнатенко Г.Ф., Лапко С.И. - М.: Металлургия, 1978.-424 с.
175. Бакал С.З., Фурсов С.П., Сафронов И.И., Белкин П.Н. Исследование процесса электроискрового легирования твердым сплавом Т15К6 на. СС-генераторе при изменении частоты вибрации. Известия АН МССР, сер. физ.- техн. и мат. наук, 1972, № 2.
176. Фурсов С.П., Парамонов А.М., Добында И.В., Семенчук А.В. Источники питания для электроискрового легирования. Кишинев: Штиинца, 1983.
177. А.с. 656 793. Способ электроискрового легирования/Авт. изобр. Парамонов А.М., Фурсов С.П., Добында И.В. Оpubл. в Б.И., 1979, № 14.
178. Разумов В.П., Еган О.М. Некоторые особенности механизации процесса электроискрового легирования. Электронная обработка материалов, 1977, № 4.
179. Галай В.И. Некоторые кинематические особенности механизированного электроискрового легирования сферических поверхностей. Электронная обработка материалов, 1980, № 4.
180. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Современный уровень развития электроискровой обработки металлов и некоторые научные проблемы в

этой области. / В кн.: Электроискровая обработка металлов, вып. 1. -М.: Изд-во АН СССР, 1957. - С. 9-37

181. А.с. 624 760. Устройство для электроискрового легирования металлических деталей/Авт. изобр. Кулаков В.П., Галай В.И., и др. Оpubл. в Б.И., 1978, № 35.
182. Кинетика нанесения покрытий из карбидохромовых сплавов методом электроискрового легирования/ Клименко В.Н., Каюк В.Г., Верхотуров А.Д. и др.// Порошковая металлургия. 1992. №2. с. 32-37.
183. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. - М.: Машиностроение, 1978. -152 с.
184. Бугаев А.А., Перевертун А.И., Скороходов В.А., Веселовский В.М. Некоторые закономерности механизированного электроискрового легирования. Электронная обработка материалов, 1973, № 1.
185. Вероман В.Ф., Трофимов В.И. Характеристики параметров механизированного легирования. В кн.: Труды ЛПИ, Л.: изд. ЛПИ, 1972, № 326.
186. Добында И.В., Парамонов А.М., Семенчук А.В., Фурсов С.П. Об автоматизации подачи электрода при электроискровом легировании сложнопрофильных поверхностей. Электронная обработка материалов, 1977, № 3.
187. Коваль Н.П., и др. Механизированное электроискровое легирование деталей с плоскими рабочими поверхностями. Электронная обработка материалов, 1981, № 3.
188. Лазаренно Н.И., Разумов З.П, Механизация процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. Электронная обработка материалов, 1975, № 2.
189. Соколов И.А. Механизация процесса электроискрового легирования. Электронная обработка материалов, 1975, № 1.
190. Трофимов В.И. Разработка и исследование автоматизированных установок для электроискрового легирования. Электронная обработка материалов, 1978, № 1.
191. Трофимов В.И., Розанов В.А. Вопросы автоматизации электроискрового легирования металлических поверхностей. В кн.: Тезисы докладов научно-производственной конференции “Эльфа-71”, Л.: изд. ЛПИ, 1971.
192. Чжен И.А., и др. Исследование влияния некоторых переменных факторов на интенсификацию механизированного электроискрового легирования

- металлических поверхностей. Электронная обработка материалов, 1982, № 4.
193. Мартынов И.Н., Руденко И.А. Установка для упрочнения инструмента// Машиностроитель 1980. №10. с. 24-25.
 194. Каденаций Л.А., Лисовская Н.Б., Селиверстов С.Ф. Упрочнение деталей оборудования для легкой промышленности электроискровым легированием// Технология и организация производства. 1989. №2. с. 19-20.
 195. Тимошенко В.А., Иванов В.И., Просяник В.Н. Направления повышения износостойкости штампов и инструментов на предприятиях Республики Молдова/ Обзорная информация. Кишинев: МолдНИИТЭИ. 1991.-54с.
 196. Тимошенко В.А., Голдыш Е.В., Тимошенко А.В. Избирательное нанесение упрочняющих покрытий на режущий инструмент// Станки и инструмент. 1995. №11. с. 20-22.
 197. Бутовский М.Э., Дубовик Н.А., Лебедева С.П. Упрочнение и восстановление мерительного инструмента методом ЭИЛ// Научно-техническое творчество аспирантов и профессорско-преподавательского состав/ Сб. тезисов докладов 3-й юбилейной научно-практической конференции Бийского технологического института.- Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. 1995. -ч.2.- с. 112-113.
 198. Электротехнический справочник. В 3 т. Т. 3: В 2 кн. Кн.2. Использование электрической энергии / Под. общ. ред. профессоров МЭИ: И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. –7-е изд., испр., и доп. М.: Энергоатомиздат, 1988. 616 с.
 199. Верхотуров А.Д., Мулин Ю.И., Ярков Д.В., Вишневский А.Н., Масленко А.С., Метлицкая Л.П. Защитные покрытия, образуемые при электроискровом легировании новыми электродными материалами на основе вольфрама, полученного непосредственно из минерального сырья. Ж. Перспективные материалы 1999. №1. с.70-79.
 200. Мулин Ю.И., Климова Л.А., Ярков Д.В. Феноменологическое описание закономерностей формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании. // Ж. Физика и химия обработки материалов. 2000, №3, с. 50-56.
 201. Мулин Ю.И., Гостищев В.В., Ярков Д.В., Метлицкая Л.П., Вишневский А.Н. 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

202. Верхотуров А.Д., Мулин Ю.И., Метлицкая Л.П., Ярков Д.В., Кочев В.М., Потапова Н.П. 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 Российской Федерации АН. Владивосток 1998. с.118-122
203. Патент на изобретение РФ RU 2162488 С2 по заявке № 98115182 от 05.08.98. Способ восстановления деталей. Мулин Ю.И., Вишневский А.Н., Христюк В.Д., Лысич А.М., Ярков Д.В. Оpubл. 27.01.2001 Бюл. №3
204. Лемешко А.М. Исследование эрозии электродов при электроискровой обработке тугоплавких металлов и их соединений с углеродом, бором и азотом. Автореферат канд. дис. К.: ИПМ АН УССР. 1971. 24 с. с ил.
205. ГОСТ 6130-71 Введение в теорию термического анализа. М.: Изд-во стандартов, 1971, 37с.
206. Бачей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. - Киев: Наук. думка, 1988. - 237 с.
207. Дрейкер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика (Книга 1). 1986. 365 с.
208. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей электромеханической обработкой. М.: Машиностроение, 1968. 207 с.
209. В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирстов. Физические основы прочности тугоплавких материалов. Киев.: Наукова думка, 1975. 316 с.
210. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1987.- 526с.
211. Петрович М.А., Давидович М.И. Статистическое оценивание и проверка гипотез на ЭВМ.- М.: Финансы и статистика, 1969. - 189 с.
212. Ганчар В.И., Михайлов В.В., Пасинковский Е.А. Асимметричное тепловыделение в металлических контактах. // Электронная обработка материалов. 1998. №3- 4. с.59-62
213. Материалы в машиностроении. Справочник/ Под.ред. И.В. Кудрявцева. Т. IV- М.: Машиностроение, 1969. - 247 с.
214. Ким В.А. Повышение эффективности упрочняющих технологий за счет резервов структурной приспособляемости режущего инструмента. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. -Ростов-на-Дону, 1994. - 37 с.

215. Самсонов Г.В. Тугоплавкие соединения. Справочник по свойствам и применению. - М.: Изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии, 1963. - 399 с.
216. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Егоров Ф.Ф. и др. Закономерности формирования покрытий на стали при ЭИЛ гетерофазными материалами TiB_2 - Mo // Порошковая металлургия. 1983. № 12. С.61-63.
217. Bergman E., Vogel J., Simmen L. Failure mode analysis of coated tools // Thin solid films, 153. 1987. 219-231 p.
218. Костецкий Б.И. Структурно-энергетическая приспособляемость материалов при трении // Трение и износ, 6. 1985. №2, с.201-210.
219. Костецкий Б.И. Эволюция структуры и фазового состояния и механизм самоорганизации материалов при внешнем трении // Трение и износ, 14. 1993. №4, с.773-783.
220. Бойцов А.Г., Машков В.Н., Смоленцев В.А., Хворостухин Л.А. Упрочнение поверхностей деталей комбинированными способами. - М.: Машиностроение, 1991.- 144 с.
221. Мулин Ю.И., Верхотуров А.Д. Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья. Владивосток: Дальнаука, 1999.- 110с.
222. Ярков Д.В., Масленко А.С., Мулин Ю.И. Модифицирование поверхностного слоя при использовании механизированной установки модели ИМ-101. Принципы и процессы создания неорганических материалов. Тезисы докладов международного симпозиума (первые Самсоновские чтения) ДВО РАН Дальнаука г. Хабаровск, 1998г с.117-119
223. Носков Ю.Г. Оптимизация процесса механизированного электроискрового легирования прецизионных деталей приборов. Дис. канд. техн.наук., Ленинград, 1987, 156 с.
224. 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.
225. Вишневский А.Н. Исследование процессов восстановления и упрочнения матриц для прессования панелей из алюминиевых сплавов методом электроискрового легирования. Автореф. дис. канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2003 – 23с.

226. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: Учебник для втузов. М.: Машиностроение, 1990. с.40-42.
227. Николенко С.В. Создание новых электродных материалов с использованием минерального сырья и самофлюсующихся добавок для электроискрового легирования инструментальных и конструкционных материалов. Автореф. дис. канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 1996 – 24с.
228. Коваленко С.В., Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Куценко В.С. Исследование влияния механических параметров механизированной установки для эил вращающимся торцевым электродом на формирование поверхностного слоя. //Электронная обработка материалов, 2003, № 3.