

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

## Часть 2. Методологическая схема исследований процесса ЭИЛ и показатели его эффективности

\*В. И. Иванов<sup>а</sup>, **А. Д. Верхотуров<sup>б</sup>**, \*\*Л. А. Коневцов<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение,  
Федеральный научный агроинженерный центр «ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ),  
г. Москва, 109428, Россия, \* e-mail: [tehnoinvest-vip@mail.ru](mailto:tehnoinvest-vip@mail.ru)

<sup>б</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки,  
Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения  
Российской академии наук (ФГБУН ИВЭП ДВО РАН),  
г. Хабаровск, 680063, Россия

<sup>с</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки,  
Институт материаловедения Хабаровского научного центра  
Дальневосточного отделения Российской академии наук (ФГБУН ИМ ХНЦ ДВО РАН),  
г. Хабаровск, 680042, Россия, \*\* e-mail: [konevts@yandex.ru](mailto:konevts@yandex.ru)

Описано достижение требуемых функциональных свойств исполнительных поверхностей различных токопроводящих изделий машиностроения, деталей путем обработки их методом электроискрового легирования (ЭИЛ). Во второй части рассмотрены методологические вопросы, касающиеся исследований процесса ЭИЛ и выбора критериев его оценки с учетом дополнительных факторов.

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

УДК 621.9.048

DOI: 10.5281/zenodo.1345700

ВВЕДЕНИЕ

В литературе отсутствуют систематические сведения о методологии достижения, в том числе электроискровым легированием (ЭИЛ), требуемых функциональных свойств исполнительных поверхностей (ИП) различных объектов: деталей машин, инструментов для механической обработки материалов в холодном и горячем состоянии (*далее по тексту* – деталей). При этом использование методологии обеспечивает научный подход в исследованиях с учетом всех предусмотренных в ней аспектов, возможность создания показателей эффективности исследуемых процессов, в частности ЭИЛ. Методология должна составлять основу при выборе методов обработки, назначении необходимого оборудования, технологических режимов и прочего с целью достижения требуемых параметров поверхности и свойств поверхностного слоя. Ее отсутствие снижает эффективность исследований, затрудняет разработку эффективных технологий, оценку оптимальных областей применения, необходимых направлений развития ЭИЛ.

В первой части статьи рассмотрен ряд методологических схем (МС), связанных с получением функциональных ЭИЛ-покрытий. Рассмотрены основные методологические положения упрочнения и восстановления ИП методом ЭИЛ с учетом их функционального назначения (ФН), показана особая роль материала анода во взаимосвязи с материалом катода при создании легированного слоя (ЛС). В данной части работы рассмотрен подход к созданию МС исследований ЭИЛ, выбора анодного материала, критериев эффективности формирования ЛС, учета ряда дополнительных факторов, влияющих на эффективность метода.

### РАЗРАБОТКА МС ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССА ЭИЛ И ВЫБОРА КРИТЕРИЕВ ЕГО ОЦЕНКИ

На рис. 1 показаны вариант разработки МС исследования процесса ЭИЛ, основные этапы, последовательность исследований, в том числе с использованием критериев эффективности.

МС рассмотрена на примере достижения требуемых свойств ИП, в частности, износостойкости, твердости, коррозионной стойкости,

наиболее часто формулируемых исходя из ФН. Как видно из рис. 1, осуществлению процесса ЭИЛ предшествует изучение характеристик анодного и катодного электродных материалов на базе парадигмы материаловедения [1]. Материал катода определяется при конструировании детали, и при ЭИЛ его фактические характеристики лишь уточняются. Выбор материала анода рационального состава и свойств осуществляется с использованием банка научных данных. Его поиск из существующего ряда или создание новых материалов нередко вызывают затруднения, поэтому на практике часто выбирают материал электрода на основе приобретенного опыта. Последнее зачастую не учитывает ФН ИП, что приводит к низкой эффективности результатов ЭИЛ.



Рис. 1. МС исследования ЭИЛ.

Поэтому для обоснования выбора материала анода требуются прежде всего формулировка гипотезы и модельные исследования. В данной МС предлагаемой гипотезой является возможность разработки и использования критериев и параметров повышения эффективности ЭИЛ деталей (износостойкости, твердости, коррозионной и жаростойкости) с выбором анодного материала, режимов ЭИЛ (рис. 1). В соответствии с гипотезой выполняются модельные эксперименты, исследования формирования ЛС и его свойств, в первую очередь, тугоплавкими металлами IV–VI групп и другими самсонидами\* ([2, 3]), соединения которых отличаются улучшенными указанными выше свойствами, необходимыми для исполнения ФН ИП деталей машин; сюда отнесем известные металлокерамические твердые сплавы, включая безвольфрамовые.

При этом могут быть выполнены варианты исследований по созданию многослойных, толстослойных, островковых покрытий как с

применением распространенных электродных материалов, так и новых материалов, в том числе металлов и соединений Me IV–VI групп, нитридов, карбидов, боридов, получением ЛС с оксидной, сложной керамикой из нитрида бора. Выводы и рекомендации данных исследований полезны и могут быть использованы для внесения в банк научных данных по выбору анодных материалов для ЭИЛ.

На практике возникают трудности оценки эффективности процесса ЭИЛ. Поэтому ограничиваются, как правило, констатацией свойств и параметров ЛС в зависимости от материалов электродов, состава межэлектродной среды, режимов процесса ЭИЛ. В то же время вариантов получения ЛС большое количество. Отсутствие оценки эффективности процесса ЭИЛ не позволяет объективно и в полном объеме оценить возможности применяемых установок, электродных материалов, вариантов технологии ЭИЛ. Существует потребность в разработке критериев сравнительной оценки как эффективности формирования ЛС, получения его эксплуатационных свойств, так и использования самого метода ЭИЛ с учетом, например, энергозатрат, экологичности, других показателей.

На основе результатов собственных экспериментальных исследований и анализа других опубликованных данных авторами сделаны определенные шаги в направлении разработки критериев оценки эффективности процесса ЭИЛ и покрытий. В таблице [4, 5] приведены некоторые критерии оценки эффективности ЭИЛ: кинетический  $\gamma_{ЛС}$ , функциональный  $\gamma_{Ф}$ , комплексный  $\gamma_{ЭИЛ}$ , энергетический  $\gamma_{Э}$  и общий  $\gamma$ , а также формулы по определению их значений. Возможно использование также других критериев, которые, обобщая, обозначим  $\gamma_{др.}$ . Полученные фактические значения критериев эффективности процесса ЭИЛ ИП деталей могут быть основой выбора анодных материалов, использоваться для включения их в банк научных данных.

Для разработанных критериев эффективности покрытий и процесса ЭИЛ их фактические числовые значения определяются путем проведения лабораторных экспериментов, отработки режимов ЭИЛ, исследования химического, фазового составов, структуры, физико-химических и эксплуатационных свойств ЛС. Они могут быть положены в основу выводов и рекомендаций по выбору анодных материалов, использоваться для включения их в банк научных данных. А также могут быть показателями ожидаемых результатов практического применения метода ЭИЛ.

С помощью МС исследований (рис. 1) и схем, разработанных выше (часть 1 статьи), была проведена работа по обоснованию выбора мате-

\* Все тугоплавкие соединения (бориды, карбиды, нитриды, алюминиды, силициды, фосфиды и т.д.) по предложению академика М.М. Ристича с 1978 г. стали называть «самсонидами» [2, 3].

## Некоторые критерии эффективности ЭИЛ

Критерии	Формула	Примечание
$\gamma_{\text{ЛС}}$ – кинетический критерий эффективности формирования ЛС.	$\gamma_{\text{ЛС}} = \Sigma \Delta k \cdot K_{\text{п}} \cdot T_x / t, \text{ г/см}^2$	$\Sigma \Delta k$ – суммарный прирост массы катода к удельной поверхности, $\text{г/см}^2$ ; $K_{\text{п}}$ – коэффициент переноса (безразмерный); $T_x$ – время начала хрупкого разрушения ЛС, $\text{мин/см}^2$ ; $t$ – время ЭИЛ, $\text{мин}$ .
$\gamma_{\text{ф}} = \gamma_{\text{св.и}}$ – функциональный критерий эффективности свойств ЛС.	$\gamma_{\text{ф}} = \gamma_{\text{св.и}} = C_{\text{ЛС}}/C_0$	$C_{\text{ЛС}}, C_0$ – физико-химические или эксплуатационные свойства ЛС и основы соответственно.
$\gamma_{\text{ЭИЛ}}$ – комплексный критерий эффективности ЭИЛ.	$\gamma_{\text{ЭИЛ}} = \gamma_{\text{ЛС}} \cdot \gamma_{\text{ф}}, \text{ г/см}^2$	Отражает показатели формирования и свойств ЛС ( $\gamma_{\text{ЛС}}$ и $\gamma_{\text{ф}}$ ).
$\gamma_{\text{э}}$ – энергетический критерий эффективности ЭИЛ.	$\gamma_{\text{э}} = \gamma_{\text{ЭИЛ}} \cdot \gamma_{\text{ф}}/E, \text{ г/см}^2 \cdot \text{Дж}$ или $\text{г/см}^2 \cdot \text{ВА}$	$E$ – энергетический показатель, Дж или В·А – $\Sigma$ – мощность искровых импульсов.
$\gamma$ – общий критерий эффективности покрытий.	$\gamma = \gamma_{\text{ф}} \cdot P_{\text{об.}}$ , где $P_{\text{об.}}$ может включать неучтенные параметры $\mathcal{E}_k/E$	$P$ – показатель себестоимости единицы изменения свойств поверхности ЭИЛ; $\mathcal{E}_k$ – показатель экологичности процесса ЭИЛ.

\* Определяется экспериментально как максимальное время ЭИЛ до начала разрушения нанесенного слоя, оцениваемого получением отрицательного значения прироста массы катода.

риала легирующего электрода с применением критериев эффективности в последовательности, согласно предложенной МС (рис. 2). Здесь производными, соответствующими функциональному критерию, связанному с эксплуатационными свойствами ЛС  $\gamma_{\text{с}}$ , являются  $\gamma_{\text{х(ф)с}}$  – химического (фазового) состава;  $\gamma_{\text{стр.}}$  – структуры;  $\gamma_{\text{св.}}$  – физико-химических свойств.

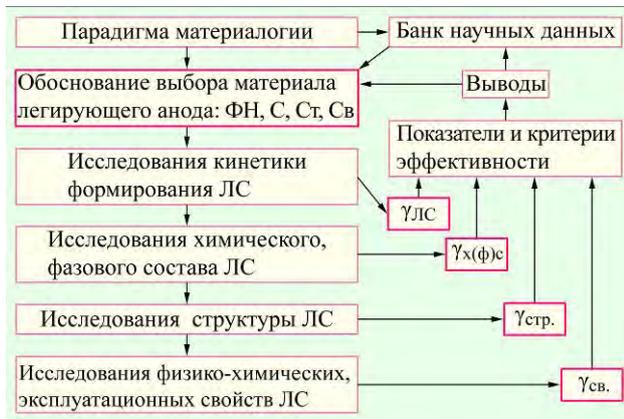


Рис. 2. МС выбора материала анода.

В соответствии с МС (рис. 2) на базе парадигмы материалологии и банка научных данных осуществлялось обоснование выбора материала легирующего анода. Было выполнено уточнение ФН анода, его состава, структуры и свойств. Затем выполнялось предварительное исследование кинетики массопереноса модельных материалов на примере элементов IV–VI групп (исходя из частной задачи при уточнении ФН). Среди модельных анодных материалов отбирались металлы, обладающие наибольшим суммарным электромассопереносом на катод  $\sum_{t=0}^{t=t_x} \Delta k$  и не имеющие порога хрупкого разрушения ( $T_x$ ) в пределах назначенных режимов и

длительности ( $t$ ) ЭИЛ единичной поверхности. Было установлено, что такими металлами являются Ti, Ta, Mo, которые входят в состав прочных и износостойких сплавов. Затем выполнялось детальное исследование кинетики массопереноса электродных материалов из Ti, Ta, Mo и других на ИП деталей с определением изменения массы катода  $\Delta k$  и коэффициента переноса  $K_{\text{п}}$ .

После чего определялись значения режимов обработки, при которых образцы с приведенной удельной площадью поверхности ( $1 \times 1$  см) имели наиболее значимые величины характеристик ЛС (толщины, физико-химических, механических и эксплуатационных свойств) при ЭИЛ с длительностью времени ( $t$ ). Далее, в соответствии с МС выбора материала анода (рис. 2), выполнялось исследование химического, фазового составов, структуры и свойств ЛС на выбранных режимах. Затем проводились анализ и обобщение результатов исследований, отбор наиболее значимых показателей и определение значений критериев эффективности:  $\gamma_{\text{ЛС}}, \gamma_{\text{ЭИЛ}}, \gamma_{\text{св.и}}$ . В результате были сформулированы выводы и предложения по внесению полученных сведений в банк научных данных и использованию их для обоснования выбора материала легирующего анода (рис. 2).

Следует отметить, что обоснование выбора известных и разработка новых критериев эффективности ЭИЛ и формирования ЛС на ИП деталей связаны, в первую очередь, с функциональным назначением ИП (рис. 3) и требуемыми их эксплуатационными свойствами.

Согласно ФН ИП детали для обеспечения ее эксплуатационных свойств разрабатывается технология ЭИЛ, характеризующаяся кинетикой формирования ЛС и энергетическими затратами использования метода, обеспечивающая получение требуемых сплошности, шероховатости,

толщины покрытия, микротвердости, сцепляемости с основой и других показателей, определяемых структурой, химическим и фазовым составом ЛС. Структура и свойства ЛС, в свою очередь, определяются преимущественно физико-химическими и эксплуатационными свойствами материала анода из ряда известных или новых материалов.



Рис. 3. Обоснование выбора критериев эффективности формирования ЛС на ИП деталей методом ЭИЛ.

Параметры, характеризующие процесс формирования ЛС ( $\gamma_{ЛС}$ ), его свойства ( $\gamma_{\phi}$ ) и их комплексное действие ( $\gamma_{ЭИЛ}$ ), а также связь с энергетическими затратами ( $\gamma_{э}$ ) (рис. 1), можно отнести к основным критериям эффективности ЭИЛ и формирования ЛС.

Кроме указанных критериев эффективности, характеризующих метод ЭИЛ и формируемый ЛС, могут быть разработаны и другие критерии на основе ФН ИП деталей машин и достигаемых физико-химических и эксплуатационных свойств анодного материала и ЛС. Их разработка обуславливается требованиями учета ряда других факторов, оказывающих существенное влияние на эффективность ЭИЛ и определяющих выбор анодных материалов. В основе такой разработки лежит ФН ИП деталей, определяющее физико-химические и эксплуатационные свойства материалов катода и анода.

#### УЧЕТ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВЫБОР КРИТЕРИЕВ

Существует множество факторов, которые надо учитывать при выборе имеющихся и разработке новых критериев, определяющих эффективность ЭИЛ, при создании новых анодных материалов (рис. 3). Кроме рассмотренных выше, определяющих выбор критериев эффективности ЭИЛ, следует учитывать ряд других факторов, оказывающих наиболее суще-

ственное влияние на физико-химические и эксплуатационные свойства анода, формирование ЛС. Среди них, по нашему мнению, выделяются следующие доминирующие факторы, учет которых может привести к разработке и созданию новых критериев эффективности ЭИЛ, показать оценку и новые возможности метода ЭИЛ в его исследованиях:

1. *Твердость, температура плавления, модуль упругости* играют значительную роль среди факторов, влияющих на выбор материала анода и обоснование критериев эффективности ЭИЛ. Их следует отнести к доминирующим факторам, определяющим формирование ЛС, его химический и фазовый состав для создания износостойких поверхностных слоев на ИП деталей, отвечающих ФН. Например, можно назначить зарекомендовавшие себя тугоплавкие элементы IV–VI групп таблицы Менделеева и сплавы на их основе. При назначении состава электродных материалов, в зависимости от ФН ЛС, можно ориентироваться на «пирамиды» плавления и твердости (рис. 4, 5), построенные и дополненные нами на основе разработок Г.В. Самсонова, И.Ф. Прядко, П.С. Кислого в Институте проблем материаловедения (ИПМ) и Институте сверхтвердых материалов НАН Украины [6].

Использование данного подхода можно рекомендовать, в частности, для модельных исследований при создании анодных материалов, которые обеспечивали бы формирование ЛС повышенной твердости, износостойкости, других улучшенных свойств, определяемых исходя из ФН ИП. При этом существует потребность создания «библиотеки», банка данных соединений исходных металлов и *p*-элементов, которые с С, N, В (в частности, металлами IV–VI групп) позволяют получать токопроводящий анодный материал и ЛС, содержащий самсониды, по твердости и температуре плавления превосходящие WC (рис. 4, 5 [7]).

2. *Модуль упругости ( $E_y$ ) материалов* имеет взаимосвязь с твердостью (рис. 6) и также является одной из важнейших характеристик, влияющих на эксплуатационные свойства ЛС. Его также можно отнести к доминирующим факторам при выборе анодного материала. Идея повышения модуля упругости может быть плодотворной при создании слоистой структуры ИП деталей машин с плавным переходом  $E_y$  от ее основы к ИП внешнего воздействия.

Анализ физико-химических и эксплуатационных свойств ИП ответственных деталей машин, инструментальных материалов показал, что, например, вольфрамсодержащие твердые сплавы, по сравнению с безвольфрамовыми на основе  $Al_2O_3$ , имеют более высокие значения  $E_y$ ,

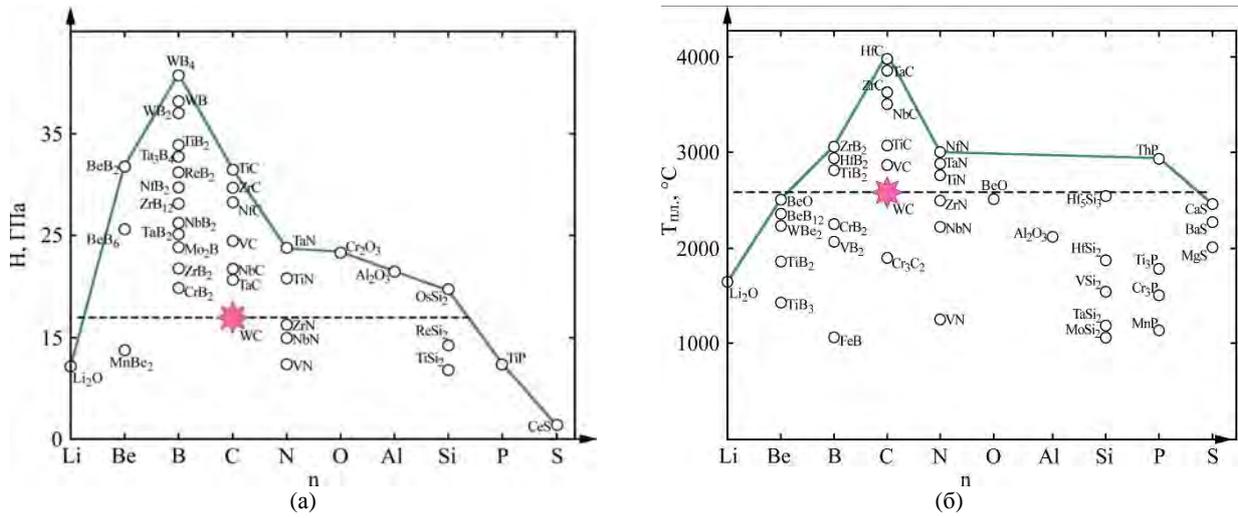


Рис. 4. «Пирамиды» твердости (а) и температуры плавления (б) некоторых соединений металлов.

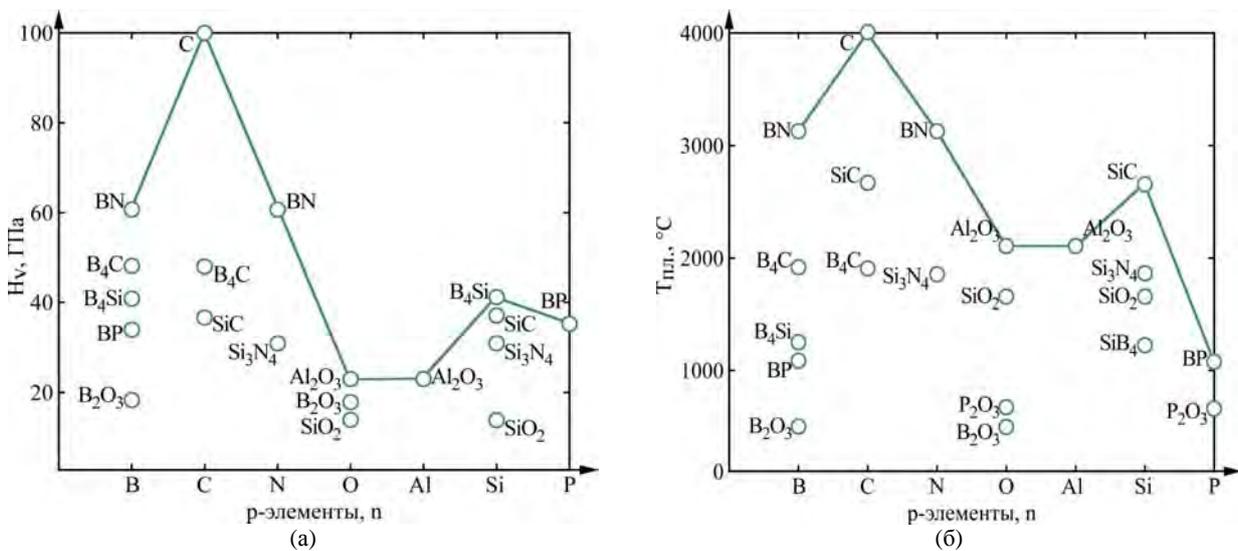


Рис. 5. «Пирамиды» твердости (а) и температуры плавления (б) соединений  $p$ -элементов.

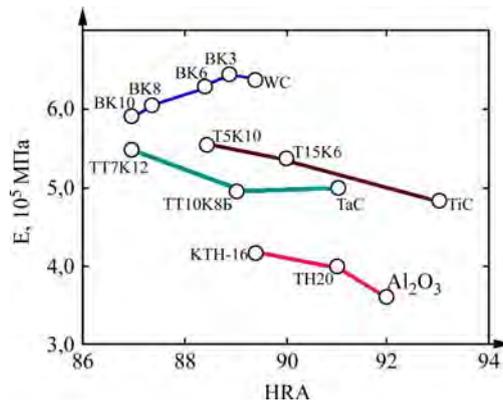


Рис. 6. Зависимость модуля упругости  $E_y$  от твердости инструментальных материалов.

трещиностойкости, пластичности, предела прочности при изгибе, однако уступают им в твердости [8]. Очевидно, что перспективу имеет создание анодных материалов, в состав которых входят самсониды с повышенными характеристиками  $E_y$ , температуры плавления, твердости для нанесения методом ЭИЛ на ИП деталей функциональных покрытий, в частности многослойных.

3. Выбор макроструктуры ЛС также является значимым показателем процесса ЭИЛ ИП, требующим учета при выборе критериев эффективности, который также следует отнести к доминирующим факторам. Создаваемые покрытия могут быть одно- или многослойными (рис. 7). Например, если исходя из ФН ИП требуется достижение износостойкости, то формируют слоистые покрытия чаще однослой-

ными по схеме: металл-самсонид – основа, сплав-самсонид – основа, композит – основа либо ЛС, в котором имеется слой из тугоплавких соединений и переходный с дисперсными включениями (рис. 7). Однако больший эффект достигается от применения многослойных покрытий. Они реализуют идею плавного перехода от обычных свойств материала детали к повышенным свойствам ИП, работающей в экстремальных условиях.

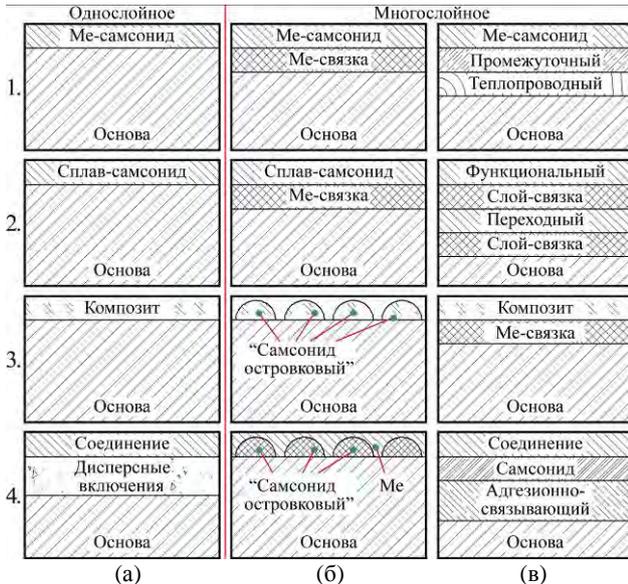


Рис. 7. Теоретические схемы макроструктуры ЭИЛ-покрытий деталей.

В идеале каждому материалу детали в соответствии с характером воздействия на ИП должны быть приданы переменные свойства с плавным переходом от исходных (основной базы детали) до требуемых значений ИП, отвечающих ФН. Макроструктура слоистых (более одного слоя) покрытий может конструироваться с чередованием функционального слоя и слоя-связки, например варианты 1б, 2б, 2в, 3в (рис. 7). Для повышения износостойкости эффективна островковая структура покрытий ИП деталей самсонидами, например, с получением в основании «островка» белого слоя (вариант 3б), а также с заполнением межостровкового пространства ЛС легкоплавким износостойким материалом (например, медью и ее сплавами) – вариант 4б (рис. 7). Возможны другие варианты формирования макроструктуры.

4. *Смачиваемость материалов* анода и катода в микроразрывах расплава и осаждение при искровых разрядах в значительной степени влияют на формирование ЛС и зависят от соотношения их теплофизических свойств, краевого угла смачивания материала расплава  $\Theta$  (рис. 8).

Этот параметр также следует отнести к доминирующим при выборе критериев эффективности ЭИЛ. Как известно [8], он связан с равно-

весным состоянием сил между фазами:  $\cos \Theta = (\gamma_{тг} \cdot \gamma_{тж}) / \gamma_{жг}$ ; где  $\gamma_{тг}$  – твердой и газовой;  $\gamma_{тж}$  – твердой и жидкой;  $\gamma_{жг}$  – жидкой и газовой. С уменьшением  $\Theta$  адгезия расплавленного анодного материала выше, эффективнее массоперенос.

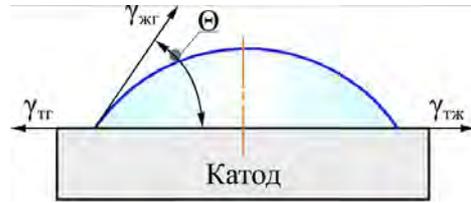


Рис. 8. Равновесие сил при смачивании.

5. *Растворимость материалов* системы «анод-катод-среда» положительно влияет на формирование ЛС и его свойств при ЭИЛ. Среди работ, посвященных выбору электродных материалов с учетом физико-химических, механических и эксплуатационных свойств, особое место занимают исследования А.Д. Верхотурова, включая диаграмму растворимости (рис. 9) [9].

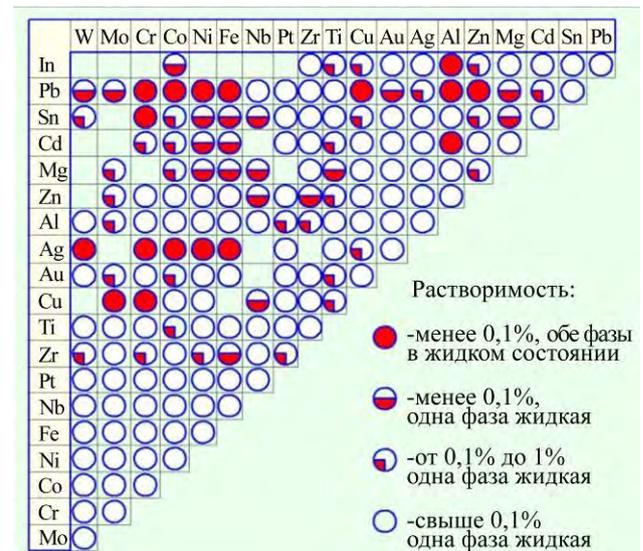


Рис. 9. Диаграмма растворимости химических элементов при ЭИЛ: чем выше растворимость, тем эффективнее формирование ЛС (по А.Д. Верхотурову) [9].

Оценку растворимости элементов для прогноза получения составов ЛС методом ЭИЛ также можно выполнить с использованием составленной в ИПМ НАНУ версии таблицы Менделеева применительно к задачам материаловедения [10]. Пользуясь ею, например при ЭИЛ железа ( $\text{Fe}$ :  $n = 26$ ;  $3d^6 4s^2$ ) и сталей для выбранных анодных материалов и сред, можно прогнозировать состав ЛС:

– непрерывные твердые растворы:  $\alpha$ -V;  $\alpha$ -Cr;  $\gamma$ -Mn; Ir;  $\gamma$ -Ni;  $\gamma$ -Pd;  $\gamma$ -Pt;

– ограниченные твердые растворы на основе Fe: Be; Ti; Zr;  $\gamma$ -V;  $\alpha$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -Nb; Ce; Gd;  $\alpha$ -Hf; Mg;  $\gamma$ -Pu;  $\gamma$ -,  $\delta$ -Rh; Ta;  $\gamma$ -Cr; Mo; W; Re;  $\alpha$ -,  $\delta$ -Mn; Os,

Cu,  $\alpha$ -,  $\gamma$ - $\delta$ -Ru;  $\alpha$ -,  $\delta$ -Co;  $\alpha$ -,  $\beta$ -Rh;  $\alpha$ -,  $\beta$ -Ni;  $\alpha$ -,  $\delta$ -Pd; Au; B; C;  $\alpha$ -,  $\delta$ -Pt;  $\alpha$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -Zn; Al; Ga; Si; Ge; Sn;  $\alpha$ -,  $\gamma$ -N; P; As; Sb; O; S;  $\alpha$ -,  $\gamma$ -H;

– ограниченные твердые растворы с Fe на основе других элементов:  $\delta$ -,  $\beta$ -Mn; Mo; Pu;  $\beta$ -,  $\gamma$ -U; W;  $\alpha$ -,  $\beta$ -Zr; Al; Au; Co;  $\alpha$ -,  $\beta$ -Be; Ce; Cu; Dy; Er; Gd; Ge; Mg; Nb;  $\varepsilon$ -,  $\delta$ -Pu;  $\alpha$ -,  $\beta$ -Ti;

– соединения: Be; Sc; Y; Ti; Zr; Hf; Th; V; Nb; Ta; Gd; Pu; Ce; Dy; Er; Ho; Lu; Nd; Cr; Mo; U; Re; Co; W; Ir; Ni; Pr; Rh; Sm; Tm; Pd; Pt; B; Al; Ga; C; Si; Ge; Sn; Zn; N; P; As; Sb; O; S; Se; Te; H;

– эвтектические смеси: Ge; N; Nb; O; P; Pu; S; Sb; Si; Ta; Th; Ti; U; Zn; Zr; Al; As; B; Be; C; Ce; Dy; Er; Gd; Hf; La; Mg; W;

– сплавы: Na; K; Mg; Ca; Sr; Ba; Ag; Hg; Tl; Pb; Bi; U; Rb; Cd.

Однако для соединений этот параметр требует создания банка данных.

6. «Химическое сродство» материалов также следует отнести к доминирующим факторам, обширная группа которых влияет на формирование и свойства ЛС, выбор и разработку новых критериев эффективности ЭИЛ. Еще Д.И. Менделеев в своей диссертации предполагал, что силы химического действия («химическое сродство») зависят от размеров частиц, расстояний между ними при взаимодействии. Академик А.А. Байков определяет данный фактор как способность каждого простого тела соединяться с другими элементами и образовывать с ними сложные тела, в большей или меньшей степени склонные давать новые, сложнейшие соединения.

При ЭИЛ этот фактор можно рассматривать как комплексный показатель ряда других влияющих на него факторов, изучение которого ждет своих исследователей. Например, соотношение эрозии  $\Delta_z$  материалов анода и катода повышает эффект ЭИЛ при  $\Delta_{за} \gg \Delta_{эк}$  [11]. В свою очередь  $\Delta_z$  зависит от показателей:  $c$ ,  $\rho$ ,  $\lambda$ ,  $T_{пл.}$ ,  $T_x$  (соответственно удельных теплоемкости, электропроводности, теплопроводности, температуры плавления, хладноломкости материалов анода и катода) [11]. Еще в 1951 г. Л.С. Палатник (Харьковский государственный университет) провел исследования искрового разряда, и соотношение  $K = Cr\lambda T^2$  получило название критерия эрозионной стойкости Палатника [12].

К данной группе показателей можно отнести соотношение величин радиусов атома для анодного материала ( $r_a$ ) и материала подложки-катода ( $r_k$ ), отвечающих требованиям равенства, либо  $r_a \leq r_k$  [9]. Для элементов радиус атома  $r_{ам}$  легко определить по таблице Менделеева [10] (порядковый номер совпадает с атомным радиусом, например,  $Cl = 17$  и  $r_{ам} = 17$  пм).

При формировании соединений в ЛС этот вопрос ждет своих исследователей.

Следует отметить, что на силы химического взаимодействия оказывает влияние рентгеновская плотность ( $\rho$ ). При ЭИЛ эффект формирования ЛС выше, если для материалов анода и катода  $\rho_a \geq \rho_k$  [9]. Интерес представляет также параметр «жесткости» межатомной связи ( $\alpha^*$ ) (рис. 10), предложенный [13].

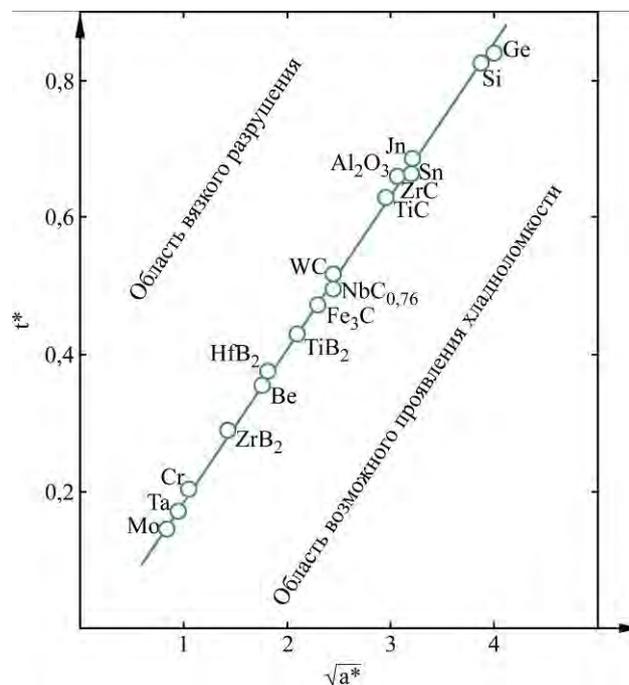


Рис. 10. Температура начала резкого роста критического напряжения сдвига  $t^*$  в функции от параметра  $\alpha^*$  материалов с высоким уровнем напряжения Пайерлса-Набарро [13].

Чем больше «жесткость» межатомной связи (чем больше параметр  $\alpha^*$ ), тем выше оказывается значение  $t^*$  и, следовательно, меньше высокотемпературная область, в которой повышается роль пластической деформации без угрозы хрупкого разрушения. Параметр  $\alpha^*$  (рис. 10) [13] показывает возможность создания ряда анодных материалов с использованием карбидов, боридов, корундов, тугоплавких металлов IV–VI групп, соединений Si, N и других; его использование может служить для прогнозирования свойств ЛС и ждет своих исследователей.

Таким образом, показан методологический подход к исследованию процесса ЭИЛ, разработке критериев его эффективности, обоснованному выбору анодного материала. Предложена МС выбора критериев эффективности формирования ЛС на ИП деталей методом ЭИЛ, направленных на обеспечение соответствия их ФН. Рассмотрен ряд факторов, влияющих на эффективность применения метода ЭИЛ и выбор критериев эффективности, большое их количество свидетельствует о наличии широкого поля деятельности для исследований ЭИЛ.

## ВЫВОДЫ

1. Показаны методологические подходы к исследованию процесса ЭИЛ, обоснованному выбору анодного материала, предопределяющего в значительной мере свойства ЛС.

2. Предложена методологическая схема выбора критериев эффективности формирования ЛС методом ЭИЛ, направленных на обеспечение соответствия ИП функциональному назначению.

3. Приведены и рассмотрены доминирующие факторы, влияющие на эффективность ЭИЛ, выбор и разработку критериев эффективности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Верхотуров А.Д., Козырь А.В., Коневцов Л.А. *Научные основы разработки и получение слоистых материалов на поверхности твердых сплавов*. Владивосток: Дальнаука, 2016. 275 с.
2. Kislyi P.S. *Science of Sintering*. 1978, (6), 25–31.
3. Г.В. Самсонов – ученый, учитель, друг. Под ред. М.А. Васильковской, В.И. Ивашенко, П.С. Кислого, И.И. Тимофеевой, Л.И. Фиялка. Киев: Наукова Думка, 2012. 192 с.
4. Ivanov V.I., Verkhoturou A.D. and Konevtsov L.A. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2017, **53**(3), 218–223.
5. Ivanov V.I., Verkhoturou A.D. and Konevtsov L.A. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2017, **53**(3), 224–228.
6. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. *Тугоплавкие соединения*. Справочник. 2-е изд. М.: Металлургия, 1976. 558 с.
7. Верхотуров А.Д., Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Коневцов Л.А. и др. *Высокоэнергетическое локальное воздействие на вольфрамсодержащие материалы и металлы*. Владивосток: Изд-во ДФУ, 2012. 472 с.
8. *Физика. Большой энциклопедический словарь*. Под ред. А.М. Прохорова. 4 изд. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. 944 с.
9. Верхотуров А.Д. *Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании*. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с.
10. Щур Д.В., Помыткин А.П., Загинайченко С.Ю., Лысенко Е.А. и др. *Периодическая система элементов Д.И. Менделеева применительно к задачам материаловедения*. Киев: типография КПИ, 2015. 1 л.
11. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. *Электродные материалы для электроискрового легирования*. М.: Наука, 1988. 224 с.
12. Палатник Л.С. *ДАН СССР*. 1953, **89**(3), 455–458.
13. Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А. *Физические основы прочности тугоплавких металлов*. Киев: Наукова думка, 1975. 316 с.

Поступила 29.08.17

После доработки 19.01.18

## Summary

The paper deals with obtaining required functional characteristics of functional surfaces of various conductive pieces and products of engineering industry by the application of electrospark alloying. Part 2 discusses methodological issues related to the process of electrospark alloying and the selection of criteria for its assessment with the account of additional factors influencing that selection.

*Keywords: electrospark alloying, methodology, functional characteristics, pieces, functional surface, alloyed coating, technology, anode, cathode.*