

УДК 621.9.048.4  
ВЕРХОТУРОВ А.Д.  
ИВЭП ДВО РАН, г. ХАБАРОВСК  
ИВАНОВ В.И.  
ГНУ ГОСНИТИ, г. МОСКВА  
КОНЕВЦОВ Л.А.  
ИМ ХНЦ ДВО РАН, г. ХАБАРОВСК

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

**Введение.** В настоящее время наука и техника располагают многочисленными методами изменения состава, структуры и свойств материалов [1], каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки. В этих условиях выбор наиболее эффективного метода для конкретных материалов, изделий представляет сложную задачу. В литературе отсутствуют обоснованные критерии оценки эффективности различных методов поверхностного изменения свойств, что не позволяет осуществлять выбор оптимального среди известных. Следует отметить, что в [1] приводятся общие утверждения о выборе метода: “общими параметрами, определяющими технологию нанесения защитных и износостойких покрытий для деталей различных конструкций, являются их габаритный размер и толщина отдельных элементов”. Однако такой подход не позволяет в полной мере обоснованно осуществить выбор метода нанесения покрытий, особенно такого наукоёмкого, как электроискровое легирование (ЭИЛ). Следует отметить, что для определения возможности выбора того или иного конкретного метода изменения свойств поверхности необходимо первоначально располагать критериями эффективности каждого из известных методов. Определение эффективности методов изменения свойств поверхности позволит решить две основные задачи:

- 1) выбрать наиболее эффективный метод среди известных;
- 2) определить наиболее приемлемые подходы для выбора переменных параметров процесса каждого отдельно взятого метода для получения изменённого поверхностного слоя с заданными свойствами.

Для решения первой задачи требуется определение критериев эффективности отдельных методов в соответствии с классификацией, приведённой в [1]. Эта задача ещё ждёт своего решения.

Основой для оценки эффективности метода должно быть достижение высокого и стабильного качества процесса. В работах [2, 3] полагают, что оценить качество технологического процесса невозможно без систематизации и тщательного выбора критериев оценки. Свойства технологических

систем подразделяются на три группы: эргономические, технологические и экономические [4]. Номенклатура первой группы показателей была стандартизована [5]. На наш взгляд, в свойства технологических систем должны входить и экологические.

На основании трёх приведённых групп в [4] предпринята попытка определения критериев качества порошковых покрытий введением 24 показателей. Однако эти показатели не объединены в общий критерий, определяющий эффективность процесса и необходимый для выбора того или иного его варианта. При определении показателя применяется сравнение по базовому и анализируемому технологическому методу. Некоторые показатели, приведённые в данной работе, могут быть использованы также при определении критериев эффективности для других методов. Однако для методов с неаддитивными процессами, например, формирования изменённого поверхностного слоя методом ЭИЛ, необходим другой научный подход, связанный с нелинейностью процесса формирования легированного слоя (ЛС) и его свойств.

Как известно, метод ЭИЛ металлических поверхностей отличается специфическими особенностями по сравнению с другими методами поверхностного упрочнения и легирования [6]. Первооткрывателями метода Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко установлено [7], что в начальный период ЭИЛ происходит увеличение массы катода до времени  $T_{max}$ , а затем её уменьшение и, начиная с  $T > T_x$ , масса катода становится меньше первоначального значения. Характерная зависимость этого процесса представлена кривой 1 (рис. 1). При этом Б.Р. и Н.И. Лазаренко [7] утверждали, что эрозия материала анода (легирующего электрода) изменяется аддитивно. В связи с этим назначение оптимального времени ЭИЛ представляет значительные трудности и требует обязательного установления  $T_x$  – времени хрупкого разрушения ЛС. Чем больше  $T_x$ , тем более эффективен процесс ЭИЛ, так как позже наступает период хрупкого разрушения ЛС (в отдельных случаях  $T_x$  не наблюдается и при длительном ЭИЛ). Однако эффективность процесса ЭИЛ будет зависеть не только от  $T_x$ , но и количества перенесённого материала с катода на анод, а также от усреднённого значения величины коэффициента массопереноса  $\bar{K}_п$ .

В [8] нами экспериментально показано, что в зависимости от материала электродов, режимов обработки, межэлектродной среды изменение массы катода ( $\Sigma\Delta k$ ) от удельного времени легирования ( $T$ , мин/см<sup>2</sup>) может отличаться от “классической” кривой Лазаренко и иметь различный характер (рис.1, кривые 2-6). При этом в большинстве случаев наблюдается неаддитивная зависимость эрозии от времени обработки. По кинетике массопереноса можно выделить следующие типовые зависимости (рис. 1): 1) кривая с максимумом приращения массы катода, до  $T_{max}$  (кривая Лазаренко); при этом  $T_{оп} \leq T_x$ , где  $T_{оп}$  – операционное время легирования; 2) кри-

вая непрерывного повышения массы катода; 3) стабилизационная кривая (стабилизация процесса после  $T_{ст}$ ); 4) кривая со схватыванием электродов до  $T=T_{сх}$ ; 5) отрицательный привес  $\Delta k$  во всём диапазоне времени ЭИЛ; 6) уменьшение  $\Sigma \Delta k$  с положительными их значениями.

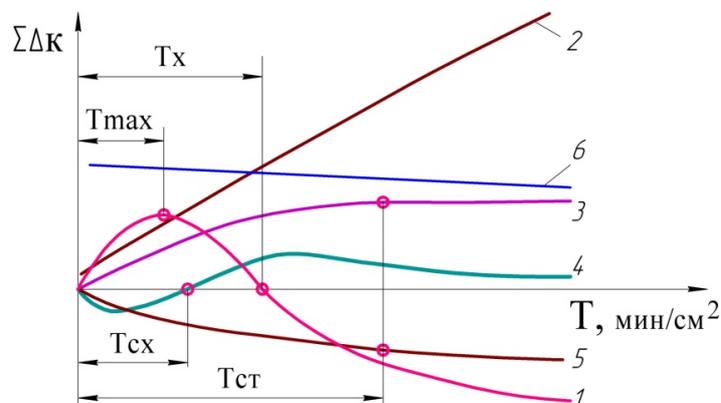


Рис. 1. Возможная кинетика массопереноса материала с анода на катод (1 – кривая массопереноса Лазаренко)

В связи с этим оценить эффективность процесса ЭИЛ крайне сложно, и на практике ограничиваются констатацией свойств и параметров ЛС в зависимости от материала легирующего электрода, режимов обработки, состава межэлектродной среды. Легко видеть, что вариантов проведения процесса ЭИЛ очень большое количество. Отсутствие оценки эффективности не позволяет полно оценить возможности различных установок, электродных материалов, технологических способов и режимов легирования. В связи с этим разработка критериев для оценки эффективности процесса ЭИЛ представляет значительный научный и практический интерес.

Задачей данной работы является разработка показателя эффективности ЭИЛ на основе исследования процесса формирования ЛС, эрозии материала электродов и межэлектродной среды, режимов обработки.

**Методика и материалы.** В качестве материала катода использовались переходные металлы IV-VI групп, стали, твёрдые сплавы; в качестве материала анода – переходные металлы IV-VI групп, сплавы на основе тугоплавких соединений, твёрдые сплавы.

При этом исследовалась кинетика формирования ЛС при ЭИЛ на воздухе и в аргоне, макро-, микроструктура поверхности, получаемые свойства в зависимости от состава, структуры, технологии ЭИЛ.

При формировании ЛС использовались установки “ЭЛФА-541”, “ЭФИ-10М”, “ЭФИ-46А”, “ЭФИ-25М”, “ЭЛИТРОН-22”, “КОРОНА-1101”. Для металлографического анализа использовались микроскопы “МИМ-10”, “НЕОФИТ”, “WDS/EDS JXA-8100”. Измерение микротвёрдости выполнялось на микротвёрдомерах “ПМТ-3”, “ПМТ-3М”.

При формулировке гипотезы введения оценочных характеристик, коэффициентов и критерия эффективности процесса ЭИЛ руководствовались

парадигмой создания материалов: “условия эксплуатации – состав - структура – технология - свойства” [9].

**Результаты и обсуждение.** На рис. 2 приведена кинетика формирования ЛС на различных режимах ЭИЛ. Видно, что наиболее типичной зависимостью  $\Delta k$  и  $\Sigma \Delta k$  от времени обработки является кривая Лазаренко. Наибольшее значение  $T_x$  наблюдается при ЭИЛ стали 45 на установке ЭФИ-46А при  $E=0,28$  Дж для Cr и Nb, а максимальный привес для Zr (рис. 2б и табл.1). При ЭИЛ твёрдого сплава ВК8 на установке “ЭЛИТРОН-22” при  $E=1,07$  Дж/см<sup>2</sup> значения  $T_x$  для Cr и Nb значительно меньше, чем для Ta, Ti, Zr. В этой ситуации оценить эффективность формирования ЛС очень сложно.

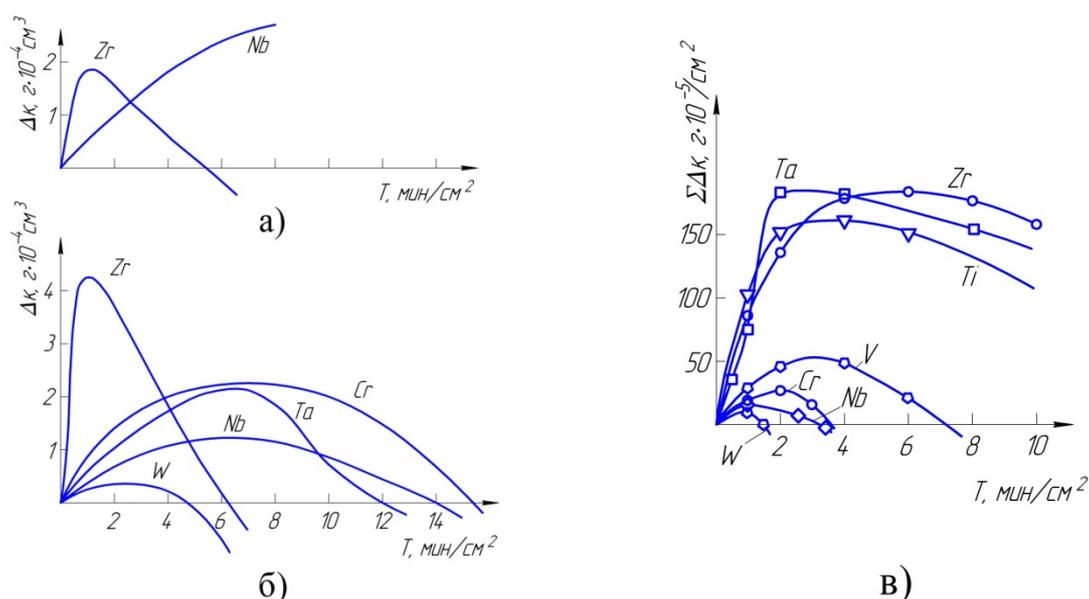


Рис. 2. Кинетика формирования ЛС переходными металлами: стали 45 на установке “ЭФИ-46А” при  $E=0,42$  Дж (а),  $E=0,28$  Дж (б); твёрдого сплава ВК8 на установке “ЭЛИТРОН-22” при  $E=1,07$  Дж (в)

Как показывает анализ кинетических зависимостей, эффективность процесса формирования ЛС значительно зависит от времени хрупкого разрушения  $T_x$  – начала хрупкого разрушения ЛС. Чем больше  $T_x$ , тем менее хрупкий ЛС. Кроме того, эффективность формирования ЛС определяется наибольшим суммарным привесом до  $T_x$ , а также наибольшим средним коэффициентом переноса  $\bar{K}_п$  материала анода на катод до наступления  $T_x$ .

В этой связи нами проведены систематизированные исследования изменения  $\Delta k$ ,  $\Sigma \Delta k$ , а также эрозии,  $T_x$ ,  $\bar{K}_п$  при ЭИЛ на воздухе и в аргоне. В табл. 1 приведены результаты ЭИЛ металлами IV-VI групп стали 45 с оценкой эффективности ЛС по следующим параметрам: суммарный привес катода ( $\Sigma \Delta k$ ,  $10^{-4}$  г), порог хрупкого разрушения ( $T_x$ , мин/см<sup>2</sup>) при ЭИЛ

металлами IV-VI групп на воздухе (в) и в аргоне (а) для двух режимов ( $E=0,28$  Дж и  $E=0,80$  Дж).

Из табл. 1 видно, что наибольшее  $T_x$  при ЭИЛ на воздухе с затраченной энергией  $E=0,28$  Дж наблюдается для Ta и Cr; в аргоне для Mo и Cr. А наибольший суммарный привес на воздухе для Mo и V; в аргоне для Mo и Cr. Судя по характеристикам показателей процесса ЭИЛ наилучшие результаты по суммарному привесу  $\Sigma\Delta k$  при ЭИЛ на воздухе с затраченной величиной энергии  $E=0,28$  Дж получены для Mo и V; а при  $E=0,8$  Дж для Zr (вдвое выше, чем для V и в 9 раз выше, чем для Mo). Показатель  $T_x$  имеет лучшие значения при  $E=0,28$  Дж для Ta, но при  $E=0,8$  Дж он выше для V (в 3,5 раза, чем для Ta), а для Cr изменение режима обработки не приводит к существенным изменениям  $T_x$ .

Таблица 1

Результаты ЭИЛ стали 45 металлами IV-VI групп

Легирующий металл	E=0,28 Дж						E=0,80 Дж					
	$\Sigma\Delta k$ (в)	$\Sigma\Delta k$ (а)	$T_x$ (в)	$T_x$ (а)	$\gamma_{ЛС}$ (в)	$\gamma_{ЛС}$ (а)	$\Sigma\Delta k$ (в)	$\Sigma\Delta k$ (а)	$T_x$ (в)	$T_x$ (а)	$\gamma_{ЛС}$ (в)	$\gamma_{ЛС}$ (а)
Ti	50	288	1.0	0	1.1	0.12	31	75	2	17	60	52
Zr	16	13	3	5	1.7	1.4	180	53	2	16	60	43
V	47	76	5	9	2.0	5.0	84	-	7	-	79.4	-
Nb	9	23	4	5	0.2	0.5	80	28	3	-	58	-
Ta	46	21	10	5	0.5	1	14	70	2	20	13	-
Cr	35	150	8	10	8	11.2	90	670	6	35	62	529
Mo	73	150	3	10	3	4	20	-	1	-	4.6	-
W	31	60	1	2	0.05	3	20	-	2	6	11.8	36.8

Оценить выбор лучшего легирующего материала представленными характеристиками затруднительно. На основании этого нами предложена формула критерия формирования ЛС  $\gamma_{ЛС}$ :

$$\gamma_{ЛС} = \sum_{T=1}^{T_x} \Delta_k \cdot \bar{K}_n \cdot T_x \quad (1)$$

Используя критерий эффективности  $\gamma_{ЛС}$  формирования ЛС можно утверждать (табл. 1), что при ЭИЛ стали 45 на воздухе и в аргоне в качестве легирующего металла среди представленных выгоднее использовать Cr при  $E=0,28$  Дж, а при  $E=0,8$  Дж на воздухе V, в аргоне Cr. При этом предполагается, что чем больше  $\gamma_{ЛС}$ , тем больше толщина ЛС, что подтверждается металлографическим анализом (рис. 3). При ЭИЛ W получены меньшие значения  $\gamma_{ЛС}$ , слой сформирован пористым и меньшей толщины.

Таким образом, критерий  $\gamma_{ЛС}$  позволяет оценить эффективность процесса формирования ЛС и подобрать материал анода для получения ЛС с высокой плотностью, толщиной, меньшей шероховатостью поверхности.

Однако в соответствии с парадигмой: “условия эксплуатации – состав – структура – технология – свойства” [9], при создании материалов необходимо достижение требуемых потребительских свойств, без которых

материал не может быть использован. То есть, используя критерий  $\gamma_{\text{ЛС}}$  нельзя оценить эффективность процесса ЭИЛ, так как  $\gamma_{\text{ЛС}}$  не учитывает эксплуатационных свойств материала.

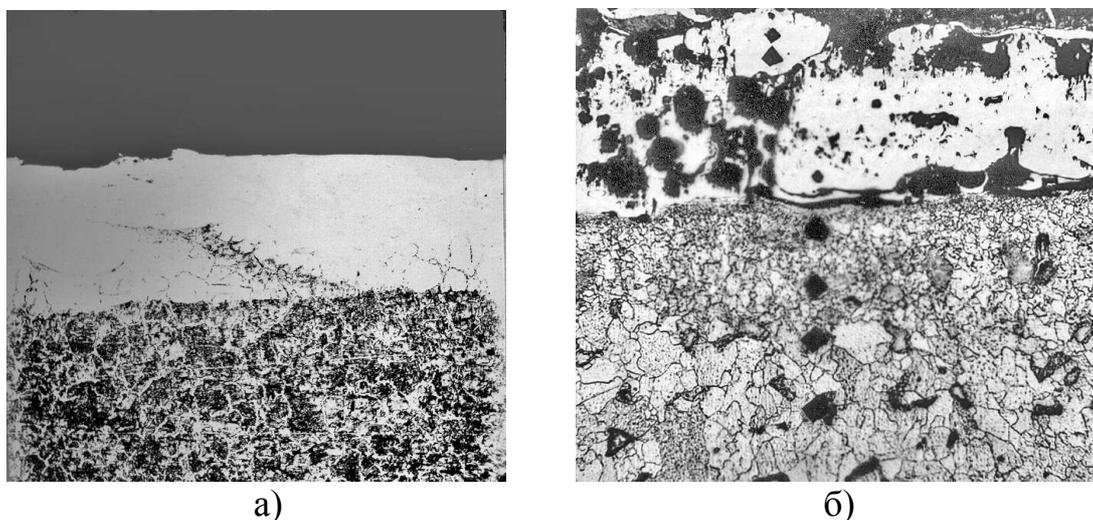


Рис. 3. Микроструктура ЛС на стали 45: (а) Cr,  $\times 450$  и (б) W,  $\times 650$ .

В табл. 2 показаны значения твёрдости ( $H_{\mu}$ , МПа), только одного из свойств материала (стали 45), после формирования функционального ЛС переходными металлами с применением режима  $E=0,8$  Дж. Как видно, наибольшая твёрдость получена после ЭИЛ стали 45 цирконием (10500 МПа) и вольфрамом (9400 МПа), почти вдвое меньшая (5700 МПа) для Cr. При этом эффективность формирования ЛС по показателю  $\gamma_{\text{ЛС}}$  для Zr и Cr практически равна (60 и 62, соответственно), а для W в 5 раз меньше (11,8). Это также вызывает трудности оценки эффективности формирования ЛС методом ЭИЛ.

Таблица 2

Твёрдость формируемого ЛС при ЭИЛ переходными металлами

Легирующий металл	Твёрдость анода $H_{\mu}$ , МПа	Твёрдость ЛС на катоде $H_{\mu}$ , МПа	$\gamma_{\text{С}}$	$\gamma_{\text{ЛС}}$	$\gamma_{\Phi} = \gamma_{\text{Э}} \cdot \gamma_{\text{ЛС}}$
Ti	1500	9000	2	60	120
Zr	1400	10500	2,33	60	139,8
Nb	1970	6700	1,49	58	86,42
Ta	4000	8400	1,87	13	24,31
Cr	1580	5700	1,27	62	78,74
Mo	2400	8700	1,93	4,6	8,88
W	4700	9400	2,09	11,8	24,6

В связи с этим мы предложили использовать для оценки эффективности процесса ЭИЛ функциональный критерий эффективности ЭИЛ  $\gamma_{\Phi}$ , учитывающий как критерий формирования ЛС ( $\gamma_{\text{ЛС}}$ ), так и оценку приме-

нения (повышения) функциональных физико-химических и эксплуатационных свойств поверхности материала после легирования, вводя коэффициент эффективности свойств ЛС ( $\gamma_C$ ).

Этот коэффициент эффективности  $\gamma_C$  может быть подсчитан как отношение величин, характеризующих те или иные физико-химические и эксплуатационные свойства ЛС ( $C_{ЛС}$ ) к аналогичным величинам свойств основы ( $C_0$ ), которые могут быть представлены величинами, характеризующими свойства твёрдости, жаростойкости, износостойкости и так далее, либо величиной одного из них.

Таким образом, при создании функциональных материалов с применением метода ЭИЛ для оценки эффективности формирования ЛС недостаточна оценка процесса ЭИЛ только по критерию формирования  $\gamma_{ЛС}$ . Для более полной оценки эффективности ЭИЛ следует учитывать коэффициент повышения эксплуатационных свойств ( $\gamma_C$ ).

$$\gamma_C = C_{ЛС} / C_0$$

Тогда эффективность процесса ЭИЛ может быть представлена формулой функционального критерия:

$$\gamma_{Ф} = \gamma_{ЛС} \cdot \gamma_C \quad (2)$$

Используя функциональный критерий эффективности  $\gamma_{Ф}$ , можно сделать вывод (табл. 2), что при формировании ЛС, отличающегося высокой твёрдостью  $H_{\mu}$ , наибольшая эффективность процесса ЭИЛ стали 45 наблюдается для электродов из Zr и Ti. А при ЭИЛ вольфрамом, отличающимся большей твёрдостью, создаются условия формирования ЛС, которые в результате приводят к меньшей эффективности по критерию  $\gamma_{Ф}$ .

Однако из табл. 1 видно, что процесс формирования ЛС существенно зависит от величины вносимой энергии  $E$ . Приведённые результаты подтверждают зависимость процесса ЭИЛ от величины  $E$ . Учёт величины энергии, затраченной на формирование ЛС, резко меняет значения показателей  $\Sigma\Delta k$ ,  $T_x$ ,  $\gamma_{ЛС}$ ,  $\gamma_{Ф}$ . Как видно из табл. 1, значения критерия  $\gamma_{ЛС}$  при ЭИЛ на воздухе на порядок увеличиваются с возрастанием  $E$  с 0,28 до 0,8 Дж. То есть для характеристики процесса ЭИЛ необходим учёт энергии, затраченной на формирование ЛС. Поэтому для оценки эффективности процесса ЭИЛ значения показателя эффективности его формирования должны быть отнесены к величине затраченной энергии. Тогда обобщающий критерий эффективности использования процесса ЭИЛ, позволяющий учитывать энергетические затраты на получение качественного слоя и его экономическую целесообразность, будет:

$$\gamma_{ЭИЛ} = \gamma_{Ф} / E; \quad (3)$$

где:  $E$  может быть выражена величиной затраченной энергии на формирование ЛС, мощностью, либо характеристиками режимов ЭИЛ, обеспечивающими требуемую величину  $E$ , необходимую для формирования заданных свойств ЛС. То есть:

$$\gamma_{\text{ЭИЛ}} = \gamma_{\text{Ф}}/E = \gamma_{\text{ЛС}} \cdot \gamma_{\text{С}}/E; \text{ или: } \gamma_{\text{ЭИЛ}} = [\Sigma \Delta_k \cdot \bar{K}_{\text{П}} \cdot T_x \cdot C_{\text{ЛС}}/C_0]/E.$$

Таким образом, для оценки эффективности процесса ЭИЛ вначале определяют величины привеса ( $\Delta_k$ ,  $\Sigma \Delta_k$ ), времени хрупкого разрушения ( $T_x$ ), среднего коэффициента переноса ( $\bar{K}_{\text{П}}$ ) материала анода на катод. Затем может быть определён критерий эффективности формирования ЛС ( $\gamma_{\text{ЛС}}$ ). После чего, используя коэффициент повышения эксплуатационных свойств ( $\gamma_{\text{С}}$ ), можно определить функциональный критерий эффективности процесса ЭИЛ ( $\gamma_{\text{Ф}}$ ). Затем полученные данные могут быть использованы для определения обобщающего критерия эффективности ( $\gamma_{\text{ЭИЛ}}$ ), который позволяет оценить влияние электрических режимов, либо назначить их, исходя из требуемых величин энергии, необходимых для осуществления самого процесса ЭИЛ.

Общий показатель эффективности покрытий (в том числе при использовании ЭИЛ) может быть представлен:

$$\gamma'_{\text{ЭФФ}} = \gamma_{\text{Ф}} \cdot \Pi \cdot \mathcal{E}_{\text{к}}/E; \quad (4)$$

где:  $\Pi$  – показатель себестоимости единицы изменения свойств обрабатываемой поверхности (либо суммарного экономического эффекта с учётом капитальных затрат и себестоимости),  $\Pi = C_1/C_2$  – себестоимость покрытия (легирования) единицы обрабатываемой поверхности по анализируемому и базовому технологическому процессу;  $\mathcal{E}_{\text{к}}$  – показатель экологичности процесса по сравниваемым показателям:  $\mathcal{E}_{\text{к}} = \mathcal{E}_{\text{к}}^1 \cdot \mathcal{E}_{\text{к}}^2 \cdot \mathcal{E}_{\text{к}}^3$ , где:  $\mathcal{E}_{\text{к}}^1$  – показатель по пылевыделению ( $\mathcal{E}_{\text{к}}^1 = \Pi^1 / \Pi_{\text{п}}^2$ , где:  $\Pi^1$ ,  $\Pi_{\text{п}}^2$  – показатели по анализируемому процессу и установленные законодательством, соответственно);  $\mathcal{E}_{\text{к}}^2$  – по газовой выделению ( $\mathcal{E}_{\text{к}}^2 = \Gamma' / \Gamma^2$  – аналогично, по анализируемому процессу и установленные законодательством);  $\mathcal{E}_{\text{к}}^3$  – по радиоактивности, ПДК и т.д.

### **Выводы.**

1. Предложен критерий оценки эффективности процесса формирования ЛС ( $\gamma_{\text{ЛС}}$ ), позволяющий определять материал легирующего электрода для получения наибольшей толщины ЛС и его сплошности.

2. Предложен функциональный критерий оценки эффективности ( $\gamma_{\text{Ф}}$ ) использования метода ЭИЛ, учитывающий как  $\gamma_{\text{ЛС}}$ , так и применение физико-химических и эксплуатационных свойств.

3. Предложен обобщающий критерий эффективности использования метода ЭИЛ ( $\gamma_{\text{ЭИЛ}}$ ), позволяющий учитывать энергетические затраты на получение качественного слоя и экономическую приемлемость использования метода.

4. Предложен общий показатель эффективности покрытий ( $\gamma'_{\text{ЭФФ}}$ ).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тушинский Л.И., Плохов А.В., Токарев А.О., Синдеев В.И. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий. М.: МИР. 2004. – 384 с.
2. Авербух Б.А. Оценка качества технологического процесса // Стандарты и качество. 1982, № 10. С. 30-31.
3. Венгеровский Ю.Я. Проблемы аттестации технологических процессов // Стандарты и качество. 1981, № 8. С. 7-8.
4. Харламов Ю.А. Классификация и критерии оценки качества процессов получения покрытий из порошковых материалов // Порошковая металлургия. 1984, № 4. С. 87-93.
5. ГОСТ 16035-81. Показатели качества изделий эргономические. Термины, определения, классификация и номенклатура. Введён 01.07.82.
6. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электродинамическая теория искровой электрической эрозии металлов. Проблемы электрической обработки материалов. М., 1962. С. 44-51.
7. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Изыскание новых методов применений электричества // Электронная обработка материалов. 1977, № 5(77). С. 5-19.
8. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 323с.
9. A.D. Verkhoturov, T.B. Ershova, and L.A. Konevtsov. Basic Ideas, Paradigms, and Methodologies of Materials Science. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2007, Vol. 41. No, 5, pp.624-628.