

# Разработка критериев оценки эффективности формирования поверхностного слоя и его свойств при электроискровом легировании.

## Часть 1. Состояние вопроса.

### Кинетический и функциональный критерии эффективности формирования легированного слоя

\* В. И. Иванов<sup>a</sup>, \*\* А. Д. Верхотуров<sup>b</sup>, \*\*\* Л. А. Коневцов<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ),  
1-Институтский проезд, 5, г. Москва, 109428, Россия, \*e-mail: [tehnoinvest-vip@mail.ru](mailto:tehnoinvest-vip@mail.ru)

<sup>b</sup>Институт водных и экологических проблем ДВО РАН,  
ул. Дикопольцева, 56, г. Хабаровск, 680000, Россия, \*\*e-mail: [verhoturov36@mail.ru](mailto:verhoturov36@mail.ru)

<sup>c</sup>Институт материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН,  
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия, \*\*\*e-mail: [konevts@narod.ru](mailto:konevts@narod.ru)

Приведены показатели эффективности электроискрового легирования (ЭИЛ), разработанные на основе исследований процесса формирования легированного слоя при разных режимах обработки, свойств поверхностного слоя и параметров шероховатости. В первой части статьи представлены кинетический и функциональный критерии оценки эффективности процесса ЭИЛ, которые позволяют осуществлять выбор материала легирующего электрода и режимов обработки для получения наибольшей толщины легированного слоя и его сплошности, а также учитывать изменения его физико-химических, прочностных и эксплуатационных свойств и параметров рельефа поверхности.

*Ключевые слова:* электроискровое легирование, эффективность, легированный слой, эрозия электрода, межэлектродная среда, режимы обработки, свойства покрытия, параметры шероховатости.

УДК 621.9.048.4

#### СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Эффективность того или иного метода обработки материалов, технологии является основой использования их в практической деятельности. Определение эффективности базируется на обоснованном выборе или разработке соответствующих критериев.

Рассматривая обработку металлических материалов, отметим, что наряду с применением механических методов (резание, давление), при которых эффективность обработки традиционно связывают с экономичностью придания заготовке требуемых форм, размеров и качества поверхности, используются также современные наукоемкие методы электрофизической обработки материалов. К этим методам относится электроискровое легирование (ЭИЛ), которое применяют для решения широкого ряда задач по увеличению ресурса различных деталей и инструментов, восстановлению размеров изношенных деталей, нанесению покрытий со специальными свойствами. Эти задачи решаются улучшением исходных эксплуатационных свойств поверхностных слоев деталей и инстру-

ментов, а также созданием нового рельефа поверхности и нанесением покрытий требуемой толщины.

Анализируя литературные данные об исследованиях и применении ЭИЛ, отметим, что к настоящему времени отсутствует комплексная система оценки эффективности как формирования поверхностных слоев, так и в целом электроискровых технологий, отражающая роль основных характеристик процесса, свойств формируемых слоев и использованной энергии. При этом надо учитывать необходимость сравнения эффективности ЭИЛ с другими методами обработки металлических материалов.

В основу данной работы положены исследования авторов метода ЭИЛ Б.Р. и Н.И. Лазаренко [1–3], их учеников и последователей [4–8].

В настоящее время современное производство располагает многочисленными методами изменения состава, структуры и свойств материалов [7], каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Выбор наиболее эффективного метода обработки для конкретных материалов, изделий представляет определенные трудности.

В литературе отсутствуют обоснованные критерии оценки эффективности различных методов поверхностного изменения свойств, что не позволяет обоснованно осуществлять выбор оптимального метода, особенно такого наукоемкого как ЭИЛ [8].

Для этого необходимы критерии эффективности методов и их значения. Универсальными критериями обычно служат общеприменяемые технические характеристики используемого оборудования для реализации этих методов: потребляемая мощность оборудования, предельные массогабаритные характеристики обрабатываемых деталей, толщина покрытий и производительность их нанесения, а также получаемый технический эффект, экономическая эффективность. Видно, что эти показатели не позволяют объективно выбрать наиболее рациональный метод обработки и не служат критериями эффективности метода формирования поверхностного слоя.

В рамках использования одного метода требуется при назначении конкретной технологии выбор переменных параметров процесса для получения измененных, с заданными характеристиками текстуры поверхностей и свойств поверхностного слоя. Использование в качестве критерия эффективности отдельных параметров процесса обработки или характеристик измененных поверхностных слоев также недостаточно.

Основная цель оценки эффективности метода – достижение высокого и стабильного качества процесса обработки. В работах [9, 10] полагают, что оценить качество технологического процесса невозможно без систематизации и тщательного выбора критериев оценки. Свойства технологических систем подразделяются на три группы: технологические, экономические и эргономические [11]. На наш взгляд, в свойства технологических систем должны входить и экологические характеристики.

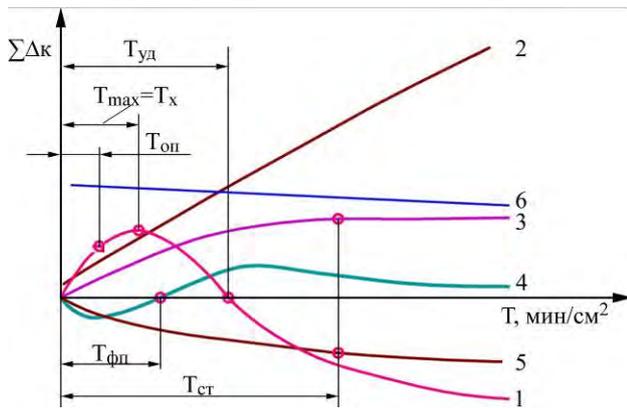
На основании трех приведенных групп в [11] предпринята попытка определения критериев качества порошковых покрытий введением 24 показателей. Однако эти показатели не объединены в общий критерий, определяющий эффективность процесса и необходимый для выбора того или иного варианта. При определении показателя применяется сравнение по базовому и анализируемому технологическим методам. Некоторые показатели, приведенные в данной работе, могут быть использованы также при определении критериев эффективности для других методов. Однако для методов с неаддитивными процессами, например формирования измененного поверхностного слоя с помощью ЭИЛ, необходим особый научный подход, связанный с

нелинейностью процесса формирования легированного слоя (ЛС) и его свойств [2–5].

Как известно, метод ЭИЛ металлических поверхностей отличается специфическими особенностями по сравнению с другими способами поверхностного упрочнения и легирования [12]. Первооткрывателями метода Б.Р. Лазаренко и Н.И. Лазаренко установлено [2, 3, 13], что в начальный период ЭИЛ происходит увеличение массы катода до времени  $T_{\max}$ , а с  $T > T_x$  (где  $T_x$  – начало хрупкого разрушения ЛС) масса катода постепенно уменьшается. Характерная зависимость этого процесса представлена на рис. 1 линией 1. При этом Б.Р. и Н.И. Лазаренко [13] утверждали, что эрозия материала анода (легирующего электрода) изменяется аддитивно. В связи с типичным, неаддитивным изменением массы катода от времени обработки назначение оптимального времени ЭИЛ представляет значительные трудности и требует обязательного установления значения  $T_x$ . 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 процессе ЭИЛ). Однако эффективность процесса ЭИЛ будет зависеть не только от величины  $T_x$ , но и количества перенесенного материала с катода на анод, а также от усредненного значения величины коэффициента массопереноса  $K_{п\text{ ср}}$ .

В [5] экспериментально показано, что в зависимости от материала электрода, 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 (рис. 1, кривая 1) и иметь различный характер (рис. 1, кривые 2–6); это, очевидно, связано со сложными и различающимися между собой микрометаллургическими процессами на поверхности катода, зависящими от химического и фазового состава взаимодействующих компонентов. При этом в большинстве случаев наблюдается неаддитивная зависимость изменения массы катода от времени обработки. По кинетике массопереноса можно выделить следующие типовые зависимости (рис. 1, кривые 1–6): 1) наиболее часто встречающаяся кривая с максимумом приращения массы катода до  $T_{\max}$ ; при этом  $T_{\text{оп}} \leq T_x$ , где  $T_{\text{оп}}$  – операционное время легирования (здесь отметим, что после достижения  $T_x$  дальнейшая обработка ЭИЛ может привести к разрушению покрытия вплоть до его полного удаления при времени  $T_{\text{уд}}$  и последующего разрушения материала основы); 2) кривая непрерывного повышения массы катода; 3) стабилизационная кривая (стабилизация процесса после  $T_{\text{ст}}$ ); 4) кривая с эрозией катода до  $T = T_{\text{фп}}$ ;

5) отрицательный привес  $\Delta k$  во всем диапазоне времени ЭИЛ; б) уменьшение  $\Sigma \Delta k$  с положительными их значениями.



**Рис. 1.** Возможная кинетика массопереноса материала с анода на катод.  $T_{уд}$  – время полного удаления покрытия;  $T_{max} = T_x$  – максимальное время до начала хрупкого разрушения;  $T_{оп}$  – операционное время;  $T_{фп}$  – время начала формирования покрытия;  $T_{ст}$  – время стабилизации массопереноса.

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

Задача данной работы – разработка показателей эффективности ЭИЛ на основе исследования процесса формирования ЛС, эрозии материала электродов и межэлектродной среды, режимов обработки, свойств ЛС и параметров шероховатости обработанной поверхности. Данная работа развивает и дополняет положения, опубликованные авторами в [14], где нами использовался критерий эффективности без учета фактического удельного времени обработки.

## МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

Работа построена на основе анализа результатов широких экспериментальных исследований авторов процесса формирования электроискровых покрытий, в том числе опубликованных в [5]. При этом в качестве материала катода использовались переходные металлы IV–VI групп, конструкционные и инструментальные стали в состоянии поставки в закаленном состоянии, металлокерамические твердые сплавы; в

качестве материала анода – переходные металлы IV–VI групп, сплавы на основе тугоплавких соединений, металлокерамические твердые сплавы.

Исследовалась кинетика формирования ЛС при ЭИЛ на воздухе и в аргоне, макро-, микро-структура поверхности, получаемые свойства поверхностного слоя и параметры шероховатости в зависимости от технологии ЭИЛ.

При формировании ЛС использовались установки «ЭЛФА-541», «ЭФИ-10М», «ЭФИ-46А», «ЭФИ-25М», «Элитрон-22», «Корона-1101», «БИГ-3» и «БИГ-4». Для металлографического анализа применялись микроскопы «МИМ-10», «НЕОФИТ», «WDS/EDS JXA-8100». Измерение микротвердости выполнялось на микротвердомерах «ПМТ-3», «ПМТ-3М», «DURAMIN 5», параметры шероховатости определялись на профилографе-профилометре «Talysurf Model 120 stylus profiler».

При формулировке гипотезы введения оценочных характеристик, коэффициентов и критерия эффективности процесса ЭИЛ руководствовались парадигмой создания материалов «условия эксплуатации → состав → технология → структура → свойства» [15].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Кинетика формирования ЛС на указанных выше установках ЭИЛ существенно различается, что связано с конструктивными особенностями установок и технологическими параметрами обработки.

Для анализа на рис. 2 приведена кинетика формирования ЛС на различных режимах ЭИЛ установок «ЭФИ-46А» и «Элитрон-22». Видно, что наиболее типичной зависимостью  $\Delta k$  от времени обработки является кривая Лазаренко. Наибольшее значение  $T_x$  наблюдается при ЭИЛ стали 45 на установке «ЭФИ-46А» при энергии импульсов  $E = 0,28$  Дж для Cr и Nb, а максимальный привес – для Zr (рис. 2б). При ЭИЛ твердого сплава BK8 на установке «Элитрон-22» при  $E = 1,07$  Дж значения  $T_x$  для Cr и Nb значительно меньше, чем для Ta, Ti, Zr.

В этой ситуации, используя традиционные приемы, оценить эффективность формирования ЛС очень сложно.

Как показывает анализ кинетических зависимостей, эффективность процесса ЭИЛ при формировании ЛС значительно зависит от времени начала его хрупкого разрушения  $T_x$ . Чем больше  $T_x$ , тем менее хрупкий ЛС. Кроме того, эффективность этого процесса определяется наибольшим суммарным привесом до  $T_x$ , а также наибольшим средним коэффициентом переноса  $K_{п ср}$  материала анода на катод до наступления  $T_x$ .

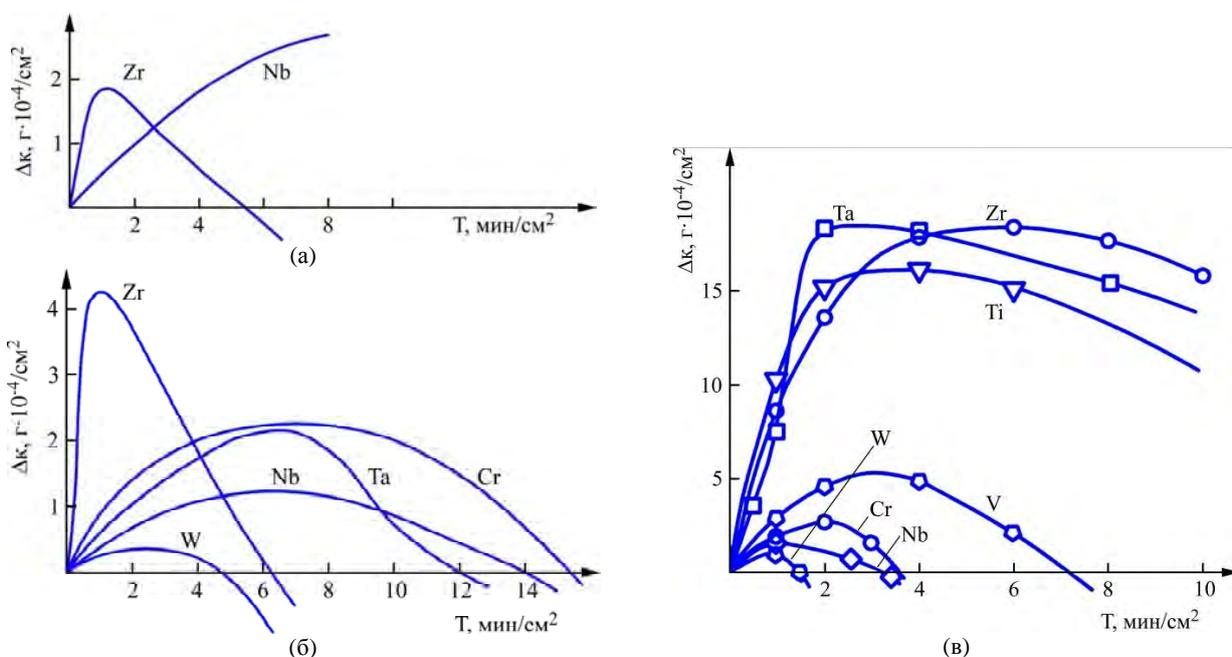


Рис. 2. Кинетика формирования ЛС переходными металлами: стали 45 на установке «ЭФИ-46А» при  $E = 0,42$  Дж (а) и  $E = 0,28$  Дж (б); твердого сплава ВК8 на установке «Элитрон-22» при  $E = 1,07$  Дж (в).

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)
	г/см <sup>2</sup>		мин/см <sup>2</sup>		г мин/см <sup>4</sup>		г/см <sup>2</sup>		мин/см <sup>2</sup>		г мин/см <sup>4</sup>	
Ti	50	28	1,0	0	0,5	0,06	31	75	2	17	30	26
Zr	16	13	3	5	0,8	0,7	180	53	2	16	30	21,5
V	47	76	5	9	1,0	2,5	84	–	7	–	39,7	–
Nb	9	23	4	5	0,1	0,3	80	28	3	–	29	–
Ta	46	21	10	5	0,2	0,5	14	70	2	20	6,5	–
Cr	35	150	8	10	4,0	5,6	90	670	6	35	31	264
Mo	73	150	3	10	1,5	2,0	20	–	1	–	2,3	–
W	31	60	1	2	0,03	1,5	20	–	2	6	5,9	18,4

Примечание. Значения  $\gamma_{ЭИЛ}$  рассчитаны и приведены для  $t_{уд} = 0,5 T_x$ .

В этой связи нами проведены систематизированные исследования изменения  $\Delta k$ ,  $\Sigma\Delta k$ , а также эрозии электродных материалов,  $T_x$ ,  $K_{п\text{ ср}}$  при ЭИЛ на воздухе и в аргоне. В таблице приведены результаты ЭИЛ металлами IV–VI групп стали 45 с оценкой эффективности формирования ЛС  $\gamma_{ЛС}$  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 таблицы 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  $E = 0,8$  Дж для Zr (вдвое

выше, чем для Cr, и в 9 раз выше, чем для Mo и W). 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 Zr, Nb, Cr изменение режима обработки не приводит к существенным изменениям  $T_x$ .

Оценить выбор лучшего легирующего материала и режимов обработки представленными характеристиками затруднительно. На основании этого ранее нами был предложен критерий эффективности формирования ЛС  $\gamma_{ЛС}$ :

$$\gamma_{ЛС} = \Delta k \cdot K_{п\text{ ср}} \cdot T_x, \text{ г} \cdot \text{мин} / \text{см}^4, \quad (1)$$

где  $\Delta k$  – удельный прирост массы катода, г/см<sup>2</sup>;  $K_{п\text{ ср}}$  – средний коэффициент переноса (безразмерный);  $T_x$  – удельное время до начала хрупкого разрушения ЛС, мин/см<sup>2</sup>.

Используя критерий эффективности  $\gamma_{ЛС}$ , можно утверждать (см. таблицу), что при ЭИЛ стали 45 на воздухе и в аргоне в качестве легирующего

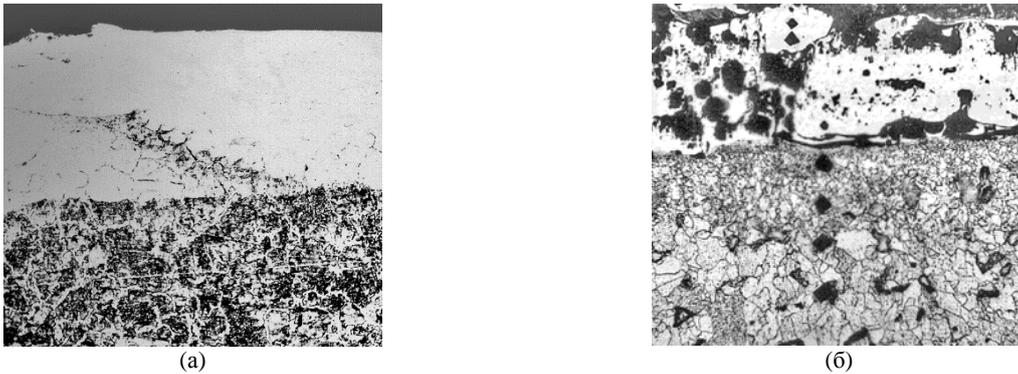


Рис. 3. Микроструктура ЛС на стали 45: (а) Cr и (б) W, х 650.

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 толще ЛС, что подтверждается металлографическим анализом (рис. 3). При ЭИЛ электродом из W получены меньшие значения  $\gamma_{ЛС}$ , слой сформирован пористым и меньшей толщины.

Расчеты показывают (см. таблицу), что эффективность процесса  $\gamma_{ЛС}$  при повышении энергии импульсов увеличивается, она повышается также при использовании электродных материалов, образующих с материалом основы неограниченные твердые растворы.

Таким образом, показанный ранее критерий формирования ЛС (*кинетический*)  $\gamma_{ЛС}$  позволяет оценить эффективность процесса ЭИЛ при формировании ЛС и подобрать материал анода для получения ЛС большей толщины и сплошности, с меньшей дефектностью поверхности.

При этом надо отметить, что в практической деятельности при использовании ЭИЛ удельное время обработки может принимать значения, существенно меньшие по сравнению с  $T_x$ . Это, естественно, скажется как на величине  $\Delta k$ , так и на величине  $\gamma_{ЛС}$ . Обозначим для последующего использования величину кинетического критерия с учетом фактического удельного времени обработки  $t_{уд} < T_x$  « $\gamma_{ЭИЛ}$ ».

С учетом сказанного в предлагаемую формулу (1) необходимо внести изменения: вместо  $T_x$  использовать параметр «удельное время обработки»  $t_{уд}$ , которое, по нашему мнению, составляет, как правило, (0,3–0,8)  $T_x$  в зависимости от технологии обработки. Тогда:

$$\gamma_{ЭИЛ} = \Delta k_{\phi} \cdot K_{п\text{ ср}} \cdot T_x / t_{уд}, \text{ г/см}^2, \quad (2)$$

где  $\Delta k_{\phi}$  – фактическое удельное значение переноса электродного материала, г/см<sup>2</sup>;  $t_{уд}$  – удельное время обработки, мин/см<sup>2</sup>.

Использование полученного соотношения позволит сравнивать фактические экспериментальные данные с другими результатами обра-

ботки ЭИЛ и более объективно оценивать эффективность формирования ЛС.

Достижение требуемых качественных и количественных характеристик результатов воздействия ЭИЛ обусловлено парадигмой «условия эксплуатации → состав → технология → структура → свойства» [15]. То есть использование только критерия  $\gamma_{ЛС}$  недостаточно, он не учитывает получаемых при ЭИЛ качественных характеристик, эксплуатационных свойств поверхностного слоя.

Очевидно, требуется помимо кинетического критерия эффективности ЭИЛ при формировании ЛС учитывать также *функциональный критерий эффективности*, определяющий функциональные свойства ЛС (в том числе его физико-механические, химические и другие свойства) и параметры рельефа поверхности. Получаемые качественные характеристики результатов воздействия ЭИЛ можно оценить, вводя функциональный критерий эффективности эксплуатационных свойств ЛС  $\gamma_{\phi}$ :

$$\gamma_{\phi} = \gamma_{\phi c} \cdot \gamma_{\phi p}. \quad (3)$$

Этот безразмерный критерий эффективности  $\gamma_{\phi}$  может быть подсчитан как произведение двух величин:

– показатель  $\gamma_{\phi c}$  изменения свойств ЛС как отношение величин, характеризующих те или иные физико-химические и эксплуатационные свойства ЛС после ЭИЛ ( $C_{ЭИЛ}$ ) к аналогичным величинам свойств основы ( $C_0$ ), которые могут быть представлены величинами, характеризующими свойства твердости, жаростойкости, износостойкости и так далее, либо величиной одного из них, то есть  $\gamma_{\phi c} = C_{ЭИЛ} / C_0$ ;

– показатель  $\gamma_{\phi p}$  изменения параметров рельефа поверхности ЛС как отношение значений принятого для анализа и расчетов параметра (например, комплексный показатель шероховатости поверхности  $\Delta$  – для необработанной после ЭИЛ поверхности или относительный радиус кривизны вершины выступов  $r_{\phi} / h_{\phi}$  – также для необработанной после ЭИЛ поверхности, или

относительной длины опорной поверхности  $l_{10(30,50)}/L$  – для подвергнутой дополнительной механической обработке поверхности легированного слоя) после ЭИЛ и исходной поверхности, к примеру,  $\gamma_{\text{фр}} = \Delta_{\text{ЭИЛ}}/\Delta_0$ , где  $\Delta_{\text{ЭИЛ}}$  и  $\Delta_0$  – значения комплексного показателя шероховатости поверхности соответственно после ЭИЛ и исходной поверхности (основы).

Таким образом,

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{\text{ф}} &= (C_{\text{ЭИЛ}}/C_0) \cdot (\Delta_{\text{ЭИЛ}}/\Delta_0) \\ \text{или } \gamma_{\text{ф}} &= (C_{\text{ЭИЛ}}/C_0) \cdot \left[ (r_s/h_s)_{\text{ЭИЛ}} / (r_s/h_s)_0 \right] \\ \text{или } \gamma_{\text{ф}} &= (C_{\text{ЭИЛ}}/C_0) \cdot \left[ (l_{10(30,50)}/L)_{\text{ЭИЛ}} / (l_{10(30,50)}/L)_0 \right] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В продолжение данной работы, во второй ее части, приведем и обоснуем применение комплексных критериев эффективности использования процесса ЭИЛ, позволяющих определить результативность условий нанесения электроискровых покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами и параметрами рельефа поверхности с учетом энергетических затрат, а также общего критерия эффективности покрытий для определения и сравнения действительности условий нанесения покрытий методом ЭИЛ и другими методами с учетом энергетических затрат, экономических и экологических факторов.

## ВЫВОДЫ

1. Предложен кинетический критерий оценки эффективности процесса ЭИЛ при формировании ЛС ( $\gamma_{\text{ЭИЛ}}$ ), позволяющий осуществлять выбор материала легирующего электрода и режимов обработки для получения наибольшей толщины ЛС и его сплошности.

2. Представлен функциональный критерий оценки эффективности ( $\gamma_{\text{ф}}$ ) использования метода ЭИЛ, учитывающий изменения физико-химических, прочностных и эксплуатационных свойств, а также параметров рельефа поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электроискровая обработка токопроводящих материалов*. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 184 с.
2. Лазаренко Н.И. *Электроискровая обработка металлов*. М.: АН СССР, 1957. С. 70–94.
3. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей*. М.: АН СССР, 1958. 117 с.

4. Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Парканский Н.Я., Ревуцкий В.М. *Электроискровое легирование металлических поверхностей*. Кишинев: Штиинца, 1985. 196 с.
5. Верхотуров А.Д. *Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании*. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с.
6. Бурумкулов Ф.Х., Лезин П.П., Сенин П.В., Иванов В.И., Величко С.А., Ионов П.А. *Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика)*. Саранск: Красный Октябрь, 2003. 504 с.
7. 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.
8. Ляшенко Б.А., Соловых Е.К., Мирненко В.И. и др. *Оптимизация технологии нанесения покрытий по критериям прочности и износостойкости*. Киев: ИПП НАН Украины, 2010. 193 с.
9. Авербух Б.А. *Стандарты и качество*. 1982, (10), 30–31.
10. Венгеровский Ю.Я. *Стандарты и качество*. 1981, (8), 7–8.
11. Харламов Ю.А. *Порошковая металлургия*. 1984, (4), 87–93.
12. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *Проблемы электрической обработки материалов*. М.: 1962. С. 44–51.
13. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. *ЭОМ*. 1977, (5), 5–19.
14. Верхотуров А.Д., Иванов В.И., Коневцов Л.А. *Труды ГОСНИТИ*. 2011, **107**(ч. 2), 131–137.
15. Verkhoturov A.D., Ershova T.B., and Konevtsov L.A. *Theor Found Chem Eng*. 2007, **41**(5), 624–628.

Поступила 22.09.15

После доработки 16.03.16

## Summary

The paper shows the efficiency of electro-spark alloying, based on studies of the formation of the doped layer under different processing conditions, the properties of the surface layer and roughness parameters. The article proposes the kinetic and functional criteria for evaluating the effectiveness of the spark alloying process, which allows to select the material of the doping of the electrode and processing modes for the maximum thickness of the doped layer and its discontinuities as well as to take into account the change of its physicochemical, strength and performance properties and parameters of the relief surface.

*Keywords: electro-spark alloying, efficiency, doped layer, erosion of electrode, inter-electrode medium, modes of processing, properties of coating, roughness parameters.*