

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

## Часть 2. Критерии эффективности процесса ЭИЛ и электроискровых покрытий

\* 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. Во второй части статьи предложены комплексный и удельный комплексный критерии эффективности использования процесса ЭИЛ, позволяющие определить действенность условий нанесения электроискровых покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами и параметрами рельефа поверхности, в том числе с учетом энергетических затрат. Также предложен общий критерий эффективности покрытий, позволяющий определить и сравнить результативность разных процессов нанесения покрытий методом ЭИЛ, а также ЭИЛ с другими методами с учетом энергетических затрат, экономических и экологических факторов.

*Ключевые слова:* электроискровое легирование, покрытие, критерии эффективности, режимы обработки, эксплуатационные свойства, параметры рельефа, затраты, сравнение методов.

УДК 621.9.048.4

В первой части данной статьи на основе анализа известных методов определения эффективности и результатов экспериментальных исследований кинетики формирования легированного слоя (ЛС) при ЭИЛ разработаны и предложены для этого метода кинетический и функциональный критерии эффективности формирования ЛС. В развитие данной темы требуется разработка критериев, позволяющих определять эффективность процесса ЭИЛ с учетом комплексного влияния этих двух параметров, а также с учетом энергетических и экономических затрат, экологических показателей.

Исходя из изложенного в первой части статьи, комплексный критерий эффективности процесса ЭИЛ с учетом кинетического и функционального критериев можно представить в общем виде:

$$Y_{\text{ЭИЛ}} = \gamma_{\text{ЭИЛ}} \cdot \gamma_{\text{ф}}, [\text{г/см}^2], \quad (1)$$

а применительно к случаю использования в качестве  $\gamma_{\text{ф}}$  комплексного показателя шероховатости поверхности  $\Delta$  эта формула преобразуется следующим образом:

$$Y_{\text{ЭИЛ}} = \Delta k_{\text{ф}} \cdot K_{\text{п ср}} \cdot T_x / t_{\text{уд}} \cdot (C_{\text{ЭИЛ}} / C_{\text{О}}) \cdot (\Delta_{\text{ЭИЛ}} / \Delta_{\text{О}}). \quad (2)$$

Рассмотрим описанное выше на практическом примере.

Одной из важных физико-механических характеристик, определяющих прочность и износостойкость материалов, является их твердость. Обработка ЭИЛ за счет применения различных режимов и электродных материалов изменяет в широких пределах микротвердость поверхностных слоев металлических материалов.

В табл. 1 приведены значения микротвердости только одного из свойств материала после формирования методом ЭИЛ на стали 45 ( $H_{\mu} = 2400$  МПа) функционального ЛС переходными металлами с применением режима  $E = 0,8$  Дж [1]. Как видно, наибольшая твердость получена после ЭИЛ стали 45 цирконием (10500 МПа) и вольфрамом (9400 МПа), почти вдвое меньшая (5700 МПа) – для хрома. При этом эффективность ЭИЛ при формировании ЛС по показателю  $\gamma_{\text{ЭИЛ}}$  для Zr и Cr весьма близка и равна 60 и 62 соответственно, а для W – в 5 раз меньше (11,8). Видно, что, исходя из этих данных, оценка эффективности формирования ЛС затруднительна.

Таблица 1. Твердость формируемого ЛС при ЭИЛ переходными металлами

Легирующий металл	Микротвердость, $H_{\mu}$ , МПа		$\gamma_{\text{фс}}$	$\gamma_{\text{ЭИЛ}}$	$Y_{\text{ЭИЛ с}} = \gamma_{\text{ЭИЛ}} \cdot \gamma_{\text{фс}}$
	Анода	ЛС на катоде*			
Ti	1500	9000	3,75	60	225
Zr	1400	10500	4,37	60	262
Nb	1970	6700	2,79	58	162
Ta	4000	8400	3,50	13	46
Cr	1580	5700	2,37	62	147
Mo	2400	8700	3,62	4,6	17
W	4700	9400	3,92	11,8	46

\* – катод – сталь 45 в состоянии поставки.

Обозначение:  $Y_{\text{ЭИЛ с}}$  – комплексный критерий эффективности процесса ЭИЛ по изменению свойств ЛС.

Однако, используя функциональный критерий эффективности  $\gamma_{\text{ф}}$ , можно оценить по комплексному критерию  $Y_{\text{ЭИЛ с}}$  продуктивность формирования ЛС с требуемыми свойствами. В табл. 1 приведены значения (без учета изменения параметров шероховатости) этого комплексного критерия эффективности ЭИЛ. Видно, что при формировании ЛС, отличающегося повышенной в 2,79–4,37 (различие в 1,6 раза) микротвердостью по отношению к материалу катода, наибольшая эффективность процесса ЭИЛ наблюдается для электродов из Zr и Ti, наименьшая – при ЭИЛ Mo. При этом различие по этому критерию эффективности составляет 15 раз.

Другими значимыми характеристиками, влияющими на несущую способность рабочей поверхности и ресурс изделия, являются рельеф поверхности и его параметры. Текстура поверхностей, полученных после ЭИЛ, отличается от текстуры поверхностей, полученных механической обработкой. Образующийся новый, типичный выпукло-вогнутый рельеф поверхности представляет собой совокупность плавно соединяющихся криволинейных участков выступов, близких по форме к шаровому сегменту. Он одинаков во всех направлениях. Характерной чертой рельефа поверхности, образованного ЭИЛ, является относительно малая высота неровностей  $h_{\text{с}}$  по отношению к радиусу кривизны вершин выступов  $r_{\text{с}}$ . Исследованиями установлено, что при ЭИЛ образцов из стали У8А в закаленном состоянии (твердость HRC 56–59) и в состоянии поставки электродами из разных материалов (W, Ti, Cu, графит МПГ-8, твердые сплавы ВК8, Т15К6, ТН-20) с использованием установок «Элитрон-22» и «Элитрон-52» в диапазоне рабочего тока 0,5–8 А и при удельном времени обработки (0,5–5)т, соответствующем 0,15–1,75 мин/см<sup>2</sup>, значения  $h_{\text{с}}/r_{\text{с}}$  для исследованной группы электродных материалов находятся в пределах 0,06–0,19 [2], что свидетельствует об их высокой несущей способности.

Приводим профилограммы поверхности, включая исходный профиль после механической обработки (рис. 1, линия 1), профиль после ЭИЛ (рис. 1, линия 2), а также профиль после ЭИЛ, поверхностно-пластического деформирования (ППД) и полировки (рис. 2). На рис. 2 жирными точками выделены впадины между выступами, которые в условиях трения со смазкой выполняют роль масляных карманов и способствуют увеличению износостойкости пары трения.

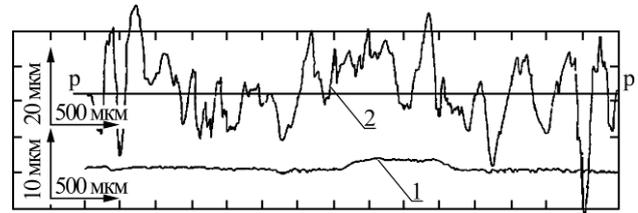


Рис. 1. Профилограммы поверхности: 1 – исходный профиль; 2 – профиль после ЭИЛ.

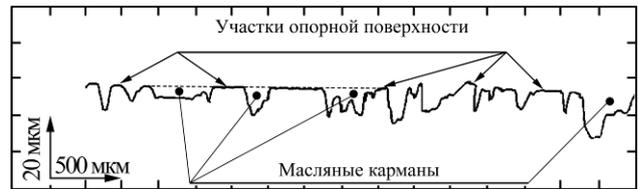


Рис. 2. Профиль после ЭИЛ, ППД и финишной обработки (полировки).

Таким образом, с использованием комплексного критерия эффективности формирования ЛС и его свойств возможна оптимизация технологии ЭИЛ, что позволяет формировать на изделиях поверхностные слои и рельеф, наиболее благоприятные для конкретных условий их эксплуатации.

В табл. 2 содержатся сравнительные данные параметров рельефа поверхности после механической обработки и ЭИЛ. Учитывалось, что в разных условиях эксплуатации рабочие поверхности с ЭИ покрытиями могут работать без доводки этих покрытий (пример: упрочнение поверхностей режущих инструментов, штампов, рабочих органов почвообработки и т.д.) с сохранением характерного выпукло-вогнутого

Таблица 2. Сравнительные данные параметров рельефа поверхности

Характеристики	Значения характеристик		
	механическая обработка	ЭИЛ (вариант 1)	ЭИЛ (вариант 2)
Комплексный показатель шероховатости поверхности $\Delta^*$	2,50 (точение стали, 5-й класс шероховатости) [4]	2,79 (покрытие стали 65Г, HRC 44–49, сплавом Т15К6 на установке «БИГ-4», $E = 1,26$ Дж)	0,44 (покрытие алюминия EA 199,7 по ИСО 209-1 медью М1 на установке «БИГ-1М», $E = 0,09$ Дж)
Относительный радиус кривизны вершины выступов $r_g/h_g$	0,4 [5]	12	18
Относительная длина опорной поверхности $l_{10(30,50)}/L$	9 (34, 62)	10 (41, 59)	14 (52, 73)

\* –  $\Delta = R_{\max}/r_{cp}b^{1/v}$ , где  $R_{\max}$  – максимальное расстояние от линии выступов до линии впадин;  $r_{cp}$  – средний радиус кривизны вершин выступов;  $b, v$  – параметры степенной аппроксимации начальной части опорной кривой профиля, определяемые экспериментально с использованием профилограмм поверхности.

рельефа поверхности, но и с последующей механической обработкой и удалением при ней некоторого поверхностного слоя, изменяющими при этом рельеф поверхности, опорную поверхность и др. Поэтому даны характеристики как для первого случая (комплексный показатель шероховатости поверхности, относительный радиус кривизны вершины выступов), так и для второго случая (относительная длина опорной поверхности). Отметим, что этот параметр вполне может быть использован и для первого случая.

Как следует из табл. 2, поверхности значительно различаются по характеристикам. Обработкой ЭИЛ можно как улучшить (снизить), так и ухудшить значение комплексного показателя шероховатости. Но полученные после ЭИЛ заметно улучшенные показатели по относительным значениям радиуса кривизны вершины выступов (в 40 и 45 раз) и длины опорной поверхности (на 10–50 %) свидетельствуют о более высокой несущей способности этих поверхностей по сравнению с поверхностью после механической обработки.

Отметим далее, что важной характеристикой качества электроискровых покрытий является сплошность. Этот термин используется специалистами по электроискровой обработке при решении разных задач. К примеру, его применяют, характеризуя качество поверхности после нанесения покрытия электроискровым способом. И его же используют, описывая поверхностный слой (белый слой, термодиффузионная зона) образца или детали, созданный этим методом.

При оценке качества электроискровых покрытий различают следующие виды сплошности:

– сплошность обработки поверхности, которая характеризуется отношением площадей участков измененного и исходного рельефов. Применяется для оценки качества покрытий в

процессе их нанесения и оценивается при 4–6-кратном увеличении;

– сплошность слоев покрытия, характеризующаяся отношением суммы длины участков слоя к базовой длине исследования. Применяется для оценки качества белого и термодиффузионного слоев электроискровых покрытий и определяется на металлографическом оборудовании;

– контактная сплошность поверхности, которая характеризуется длиной опорной поверхности. Применяется для исследования поверхностей, работающих в условиях трения скольжения или неподвижных соединений, и определяется профилографированием.

Видно, что первая и третья характеристики сплошности связаны. Они учтены при определении критерия оценки эффективности ЭИЛ, что отражено в первой части данной статьи.

Однако вторая характеристика сплошности – сплошность слоев покрытия – непосредственно в критерий оценки эффективности ЭИЛ не введена. Это связано со следующим.

Обычно принято считать наиболее качественными покрытия, обладающие наибольшей сплошностью белого слоя. Вместе с тем на практике часто достигается требуемый эффект применения ЭИЛ с относительно невысокой сплошностью. Известна также эффективность специально формируемых несплошных покрытий, названных «островковыми» [1, 3, 4] и показавших повышенные коррозионную стойкость и жаростойкость [5–7]. Поэтому в одних случаях, в зависимости от задач ЭИЛ и путей их решения, повышенная сплошность белого слоя обеспечивает рост значения критерия эффективности, а в других ведет к уменьшению этого параметра.

Указанное разнообразие этой характеристики сплошности, отсутствие единства достижения требуемого результата максимальной сплош-

ности исключают целесообразность непосредственного использования ее при определении критерия оценки эффективности ЭИЛ.

Процесс формирования ЛС существенно зависит от величины вносимой энергии  $E$ , что видно из ранее приведенных результатов. Учет величины энергии, затраченной на формирование ЛС, резко меняет значения показателей  $\Sigma\Delta_k$ ,  $T_x$ ,  $\gamma_{\text{ЭИЛ}}$ ,  $\gamma_{\text{ф}}$ . Согласно табл. 1 (часть 1), значения критерия  $\gamma_{\text{ЭИЛ}}$  при ЭИЛ на воздухе на порядок и больше увеличиваются с возрастанием  $E$  с 0,28 до 0,8 Дж. То есть для характеристики процесса ЭИЛ необходим учет энергии, затраченной на формирование ЛС. Поэтому для оценки эффективности процесса ЭИЛ значения показателя эффективности его формирования должны быть отнесены к величине затраченной энергии. Тогда *удельный комплексный критерий эффективности* использования процесса ЭИЛ, позволяющий учитывать энергетические затраты на получение качественного слоя с требуемыми эксплуатационными свойствами, с учетом (1) примет вид:

$$Y_{\text{ЭИЛ уд}} = \gamma_{\text{ЭИЛ}} \cdot \gamma_{\text{ф}} / E, \text{ [г/см}^2 \cdot \text{Дж]}. \quad (3)$$

где  $E$  может быть выражена либо величиной энергии искровых импульсов ( $E_E$ , Дж), необходимой для формирования заданных свойств ЛС, либо их мощностью ( $E_N$ , ВА), или при использовании параметров шероховатости поверхности комплексным показателем  $\Delta$  с учетом соотношения (2):

$$Y_{\text{ЭИЛ уд}} = [\Delta k_{\text{ф}} \cdot K_{\text{п ср}} \cdot (T_x / t_{\text{уд}}) \cdot (C_{\text{ЭИЛ}} / C_0) \cdot (\Delta_{\text{ЭИЛ}} / \Delta_0)] / E. \quad (4)$$

Таким образом, для оценки эффективности процесса ЭИЛ вначале определяют время крупного разрушения ( $T_x$ ), рабочее удельное время ЭИЛ ( $t_{\text{уд}}$ ), фактический привес ( $\Delta k_{\text{ф}}$ ), средний коэффициент переноса ( $K_{\text{п ср}}$ ) материала анода на катод. Эти данные позволят определить значение кинетического критерия эффективности ЭИЛ при формировании ЛС ( $\gamma_{\text{ЭИЛ}}$ ). Далее, используя соотношения показателей, характеризующих изменения свойств ЛС ( $C_{\text{ЭИЛ}} / C_0$ ) и рельефа поверхности ( $\Delta_{\text{ЭИЛ}} / \Delta_0$ ), или ( $[(r_{\text{ф}} / h_{\text{ф}})_{\text{ЭИЛ}} / (r_{\text{ф}} / h_{\text{ф}})_0]$ ), или ( $[(l_{10(30,50)} / L_{\text{ЭИЛ}}) / l_{10(30,50)} / L_0]$ ), определяют функциональный критерий эффективности процесса ЭИЛ ( $\gamma_{\text{ф}}$ ). Численные значения кинетического и функционального критериев используются в последующем для расчета комплексного критерия эффективности ЭИЛ ( $Y_{\text{ЭИЛ}}$ ) и его удельного значения ( $Y_{\text{ЭИЛ уд}}$ ).

При практическом использовании ЭИЛ для решения различных задач производства с учетом функционального критерия  $\gamma_{\text{ф}}$  предлагается учитывать также экономические и экологические показатели. В связи с этим введем *общий критерий*

*эффективности покрытий* ( $Y$ ) для универсального использования не только при применении ЭИЛ, но и других методов нанесения покрытий, значения которого определяются согласно следующему:

$$Y = \gamma_{\text{ф}} \cdot \Pi \cdot \mathcal{E}_k / E; \quad (5)$$

где  $\Pi$  – показатель себестоимости единицы изменения свойств обрабатываемой поверхности (либо суммарного экономического эффекта с учетом капитальных затрат и себестоимости),  $\Pi = C_1 / C_2$  – себестоимость покрытия (легирования) единицы обрабатываемой поверхности по анализируемому и базовому технологическому процессу;  $\mathcal{E}_k$  – показатель экологичности процесса по сравниваемым показателям:  $\mathcal{E}_k = \mathcal{E}_k^1 \cdot \mathcal{E}_k^2 \cdot \mathcal{E}_k^3$ , где  $\mathcal{E}_k^1$  – показатель по пылевыделению ( $\mathcal{E}_k^1 = P^1 / P_0^2$ , где  $P^1$ ,  $P_0^2$  – показатели по анализируемому процессу и установленные законодательством соответственно);  $\mathcal{E}_k^2$  – то же по газовой выделению ( $\mathcal{E}_k^2 = G / G^2$  – аналогично по анализируемому процессу и установленные законодательством);  $\mathcal{E}_k^3$  – то же по радиоактивности, ПДК и т.д.

Приведенная формула (5) может быть также рекомендована для сравнения эффективности применения ЭИЛ с другими методами обработки, что позволит выполнить их ранжирование по эффективности при решении практических задач. В этом случае вместо значений параметров основы материала изделия и его исходной поверхности – формулы (4) – часть 1 статьи и (2) – при расчете величины функционального критерия эффективности  $\gamma_{\text{ф}}$ , а также вместо базовых значений себестоимости изделия и экологичности технологии его производства в формулу (5) вносятся соответствующие значения параметров сравниваемого метода.

В заключение в качестве примера определим удельный комплексный критерий эффективности использования процесса ЭИЛ для следующих условий: с целью увеличения износостойкости на установке «БИГ-4» нанесли полосой 4–4,5 мм покрытие толщиной 20–22 мкм на режущие зубья круглой протяжки  $\varnothing 50$  мм из стали Р6М5 (НРС 60–62) металлокерамическим твердым сплавом ВК8, режим обработки – 5 ( $E = 0,045$  Дж), при этом за время обработки 48 минут всех 14 режущих зубьев израсходовано 6,14 г твердого сплава при коэффициенте переноса 76%. Общая площадь обработки составила 84 см<sup>2</sup>. Относительный радиус кривизны вершины выступов  $r_{\text{ф}} / h_{\text{ф}}$  составил: исходной рабочей поверхности протяжки  $(r_{\text{ф}} / h_{\text{ф}})_0 = 0,8$ ; после ЭИЛ  $(r_{\text{ф}} / h_{\text{ф}})_{\text{ЭИЛ}} = 11,2$ .

Стойкость протяжки повысилась в 3,4 раза.

Учитывая, что для данных условий ЭИЛ  $\Delta k = 6,14 \cdot 0,76 / 84 = 0,0555 \text{ г/см}^2$ ,  $T_x = 8 \text{ мин/см}^2$  (определено экспериментально), подставляя численные значения в (4), для  $t_{y0} = 0,57 \text{ мин/см}^2$  в результате расчетов получим значение удельного комплексного критерия эффективности:

$$Y_{\text{ЭИЛ}} = 0,0555 \cdot 0,76 \cdot (8/0,57) \cdot 3,4 \cdot (11,2/0,8) / 0,045 = 626 \text{ г/см}^2/\text{Дж}.$$

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

3. Предложены комплексный ( $Y_{\text{ЭИЛ}}$ ) и удельный комплексный ( $Y_{\text{ЭИЛ уд}}$ ) критерии эффективности использования процесса ЭИЛ, позволяющие определить действенность условий нанесения электроискровых покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами и параметрами рельефа поверхности, в том числе с учетом энергетических затрат.

4. Предложен общий критерий эффективности покрытий ( $Y$ ), позволяющий определить и сравнить эффективность разных процессов нанесения покрытий методом ЭИЛ, а также другими методами с учетом энергетических затрат, экономических и экологических факторов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Верхотуров А.Д. *Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании*. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с.
2. Иванов В.И. *ЭОМ*. 1998, (3–4), 43–51.
3. *Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн.* Под ред. И.В. Крагельского, В.В. Аликина. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. 400 с.
4. Ляшенко Б.А. *Проблемы прочности*. 1980, (5), 114–117.
5. Рискин И.В., Гитлевич А.Е., Михайлов В.В., Тимонин В.А. *ЭОМ*. 1978, (6), 25–28.
6. Мулин Ю.И., Верхотуров А.Д., Климова Л.А., Власенко В.Д. *Трение и износ*. 2004, **25**(6), 650–655.
7. Мулин Ю.И. *Вестник машиностроения*. 2006, (8), 63–68.

Поступила 22.09.15

После доработки 16.03.16

### Summary

The paper offers a comprehensive and integrated specific criteria for the effective use of the electro-spark alloying so as to determine the effectiveness of the conditions of application of electric-spark coatings with the required performance characteristics and parameters of the surface topography, including taking into account the energy costs. Also provided is a general criterion for the efficiency of coating, allowing to determine and compare the performance of different coating processes by the electro-spark alloying and other methods based on energy consumption, economic and environmental factors.

*Keywords: electrospark alloying, coating, performance criteria, modes of processing, performance characteristics, parameters of the relief, the cost, comparison methods.*