

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.55.J-, 68.55.Ln, 81.15.Rs, 81.40.Pq, 81.65.Lp

Исследование закономерностей процессов формирования поверхностных слоёв при электроэрозионном легировании. Часть II

В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова*, Е. В. Коноплянченко, М. Я. Довжик

*Сумский национальный аграрный университет,
ул. Г. Кондратьева, 160,
40021 Сумы, Украина*
**Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2,
40007 Сумы, Украина*

Установлены корреляционные зависимости массопереноса твёрдых износостойких и мягких антифрикционных металлов электродов при электроэрозионном легировании (ЭЭЛ) поверхностей из стали 45 от длительности обработки. На основании экспериментальных исследований предложены уравнения массопереноса и прогнозирования шероховатости поверхностного слоя, а также определены их константы.

Ключевые слова: электроэрозионное легирование, анод, катод, покрытие, поверхность, рентгеноструктурный анализ, массоперенос, шероховатость.

Встановлено кореляційні залежності масоперенесення твердих зносостійких і м'яких антифрикційних металів електрод при електроерозійному легуванні (ЕЕЛ) поверхонь зі сталі 45 від тривалості оброблення. На підставі експериментальних досліджень запропоновано рівняння масопе-

Corresponding author: Viacheslav Borysovych Tarelnyk
E-mail: tarelnik@i.ua

*Sumy National Agrarian University,
160 G. Kondratieva Str., UA-40021 Sumy, Ukraine*
**Sumy State University,
2 Rymsky-Korsakov Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

Please cite this article as: V. B. Tarelnyk, O. P. Gaponova, I. V. Konoplianchenko, and M. Ya. Dovzhyk, Investigation of Regularities of the Processes of Formation of Surface Layers with Electroerosive Alloying. Part II, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 39, No. 3: 363–385 (2017) (in Russian), DOI: 10.15407/mfint.39.03.0363.

ренесення та прогнозування шерсткості поверхневого шару, а також визначено їхні сталі.

Ключові слова: електроерозійне легування, анода, катода, покриття, поверхня, рентгеноструктурна аналіза, масоперенесення, шерсткість.

Correlation dependences of mass transfer for the hard wear-resistant and soft anti-friction metal electrodes at electrospark alloying (EEA) of steel 45 surfaces on the treatment duration are obtained. Based on experimental studies, the equations of mass transfer and the prediction of surface-layer roughness are proposed, and their constants are determined.

Keywords: electrospark alloying, anode, cathode, coating, surface, X-ray diffraction analysis, mass transfer, surface roughness.

(Получено 24 октября 2016 г.; окончат. вариант — 11 января 2017 г.)

1. ВВЕДЕНИЕ

В части 1 настоящей работы [1] представлены результаты исследований, направленных на установление закономерностей формирования поверхностного слоя при контактном и бесконтактном электроэрозионном легировании (ЭЭЛ) металлических поверхностей на железе Армко, стали 45 и 12Х18Н10Т износостойкими тугоплавкими металлами и сплавами (Cr, Ti, W, твёрдый сплав), металлами группы железа (Ni) и мягкими антифрикционными материалами (Cu). Установлено влияние подложки и материала легирующего электрода на количество перенесённого материала с анода на катод; представлен анализ влияния теплофизических характеристик подложки и природы материала легирующего электрода (анода) на топографию и шероховатость сформированного покрытия; представлены результаты исследования структуры покрытий, а также химический и фазовый состав сформированного поверхностного слоя. Установлены зависимости качества полученных слоёв от энергетических параметров процесса ЭЭЛ, материала анода и катода.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Одна из актуальных задач машиностроения — получение высококачественных поверхностей и покрытий деталей при их изготовлении. Метод электроэрозионного легирования (ЭЭЛ) может эффективно применяться для повышения срока службы быстро изнашивающихся деталей машин и режущего инструмента, а также с целью придания особых физико-химических свойств поверхности изделия [2]. Отсутствие математической модели массопереноса, позволяющей количественно описать экспериментальные concentra-

ционные зависимости, в настоящее время объясняется сложностью происходящих электро-физико-химических явлений при реализации процесса ЭЭЛ. Это затрудняет выбор режимов обработки и используемых электродных материалов, снижает эффективность применения ЭЭЛ в производстве и воспроизводимость результатов процесса [2, 3].

В данной работе для решения вышеупомянутой задачи предложена математическая модель управления качеством поверхностных слоёв деталей, позволяющая по энергетическим параметрам оборудования прогнозировать качественные параметры формируемого поверхностного слоя, а также решать обратную задачу — определять необходимые режимы ЭЭЛ для обеспечения требуемого качества поверхности. Разработана методика, позволяющая устанавливать критерии оценки альтернативных вариантов способов формирования методом ЭЭЛ поверхностных слоёв требуемого качества и выбора наиболее рационального способа. Методика апробирована при формировании покрытий на катоде из стали 45 при использовании в качестве анода различных металлов — износостойких тугоплавких и мягких антифрикционных.

2.1. Экспериментальные исследования

Методика экспериментальных исследований подробно рассмотрена в части 1 настоящей работы [1].

На рисунках 1–3 представлены результаты обработки экспериментальных данных, полученные в виде зависимостей прироста веса катода (ΔP_k), толщины сформированного слоя (Δh) и шероховатости поверхности (Ra) от мощности разряда (N_p) при ЭЭЛ.

На рисунке 1 показана зависимость привеса катода из стали 45 от мощности разряда при ЭЭЛ твёрдыми износостойкими (твёрдым сплавом ВК8 и Т15К6) и мягкими антифрикционными (оловом, медью и индием) металлами.

Как видно из рисунка 1, а, при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми сплавами ВК8 и Т15К6 с возрастанием мощности разряда плавно увеличивается привес на катоде.

При легировании стали 45 оловом ($T_{пл.} = 232^\circ\text{C}$) и индием ($T_{пл.} = 157^\circ\text{C}$) (рис. 1, б) привес образцов возрастает с использованием мощности разряда до 80 Вт, дальнейшее её увеличение приводит к нарушению стабильности процесса ЭЭЛ и отсутствию постоянства в показаниях при измерении привеса. При этом на всем протяжении легирования привес при легировании оловом значительно выше, чем при легировании индием, и достигает при мощности разряда 74,6 Вт соответственно 350 и 35 г·10⁻⁴/см². При ЭЭЛ медью ($T_{пл.} = 1084^\circ\text{C}$) процесс массопереноса стабилен на всем интервале изменения мощности разряда от 11,5 до 196,5 Вт.

Зависимость толщины слоя покрытия от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими (а) и мягкими антифрикционными материалами (б) показана на рис. 2. С ростом мощности

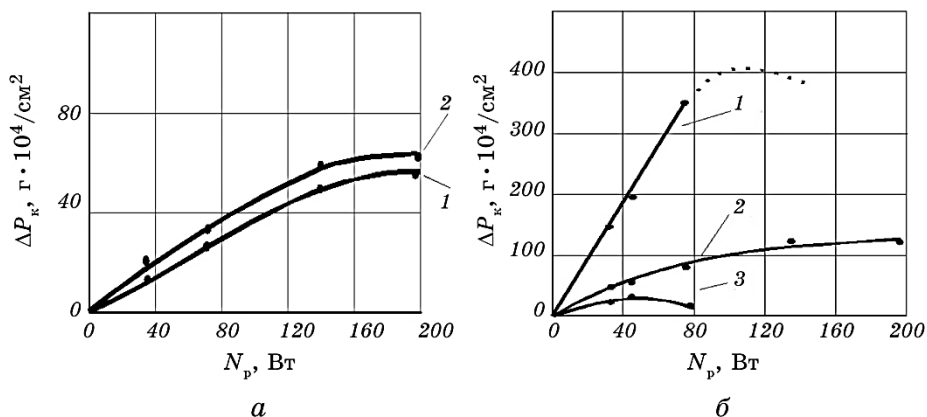


Рис. 1. Зависимость привеса катода из стали 45 от мощности разряда при ЭЭЛ: а — твёрдыми сплавами ВК8 (1) и Т15К6 (2); б — оловом (1), медью (2) и индием (3).

Fig. 1. Dependence of overweight of cathode from steel 45 on discharge capacity at the electrospark alloying with: а—hard alloys VK8 (1) and T15K6 (2); б—tin (1), copper (2), and indium (3).

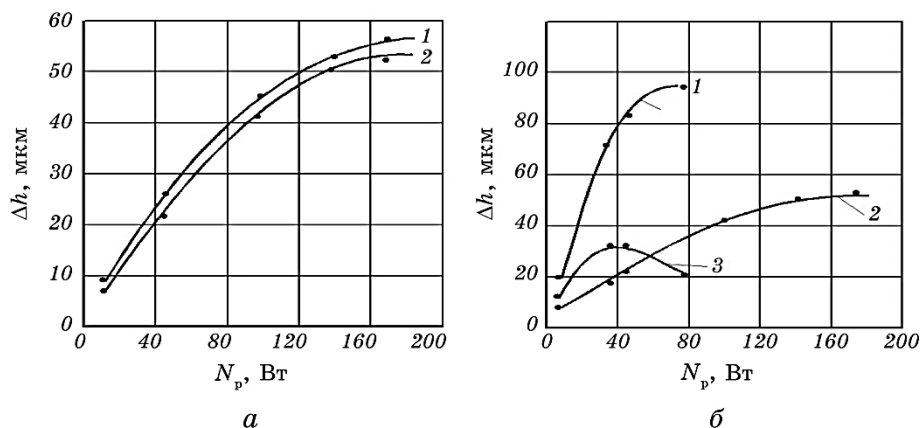


Рис. 2. Зависимость толщины покрытия от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45: а — твёрдыми сплавами Т15К6 (1) и ВК8 (2); б — оловом (1), медью (2) и индием (3).

Fig. 2. Dependence of coating thickness on the discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with: а—hard alloys T15K6 (1) and VK8 (2); б—tin (1), copper (2), and indium (3).

разряда интенсивность увеличения толщины слоя для всех материалов анода снижается, а форма кривых зависимости $\Delta h_c = f(N_p)$ близка к степенной функции.

Следует отметить, что с увеличением мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 индием толщина слоя сначала возрастает до мощности разряда 38 Вт, а затем плавно снижается. Это, вероятнее всего, связано с низкой температурой плавления индия, в результате чего дальнейшее увеличение мощности разряда приводит к более интенсивному его испарению.

При исследовании влияния мощности разряда при ЭЭЛ на величину шероховатости формируемых покрытий установлено, что для всех исследуемых материалов, как подложек, так и легирующих электродов, с увеличением мощности разряда шероховатость увеличивается. На рисунке 3 показана зависимость шероховатости поверхности от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими материалами (а): молибденом, ванадием и твёрдыми сплавами ВК8 и Т15К6, а также мягкими антифрикционными металлами (б): оловом, медью и индием. Следует отметить, что при одинаковых мощностях разряда, легирование мягкими антифрикционными металлами позволяет формировать покрытия с меньшей шероховатостью, чем при ЭЭЛ твёрдыми износостойкими материалами.

Таким образом, на основании анализа проведённых исследований, установлено, что с увеличением мощности разряда при ЭЭЛ

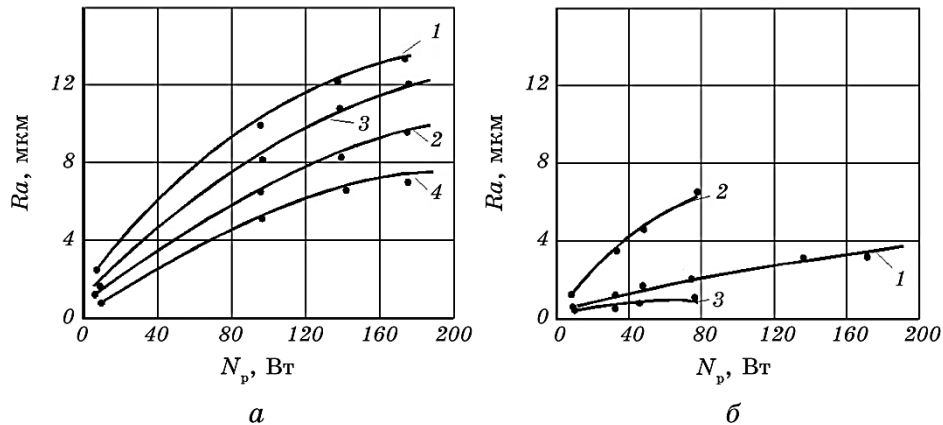


Рис. 3. Зависимость шероховатости поверхности стали 45 от мощности разряда при ЭЭЛ: а — твёрдыми сплавами Т15К6 (1) и ВК8 (2), ванадием (3) и молибденом (4); б — медью (1), оловом (2) и индием (3).

Fig. 3. Dependence of surface roughness of steel 45 on the discharge capacity at the electrospark alloying with: а—hard alloys Т15К6 (1) and ВК8 (2), vanadium (3), and molybdenum (4); б—copper (1), tin (2), and indium (3).

увеличивается количество перенесённого материала с анода на катод, толщина покрытия и его шероховатость, а характер кривых, в первом приближении, напоминает экспоненциально возрастающие зависимости.

2.2. Модель расчёта технологических параметров качества ЭЭЛ поверхностного слоя

Состав упрочнённого слоя может значительно отличаться от состава электродных материалов. Это может быть следствием ряда причин, главная из которых обусловлена спецификой воздействия процесса ЭЭЛ на электродные материалы: сверхвысокая скорость нагрева и охлаждения, контакт ювенильных поверхностей друг с другом и с элементами окружающей среды в условиях импульсного воздействия высоких температур и давлений, высокая скорость диффузионных процессов.

Хотя действие искрового разряда очень кратковременно, в процессе ЭЭЛ имеет место не только направленный перенос материала электрода на подложку, но и активное диффузионное перемещение атомов перенесённого материала в поверхностный слой подложки, химическое взаимодействие материалов электродов.

Причиной высокой адгезионной связи сформированного слоя с основой является интенсивное перемешивание материалов электродов, диффузия материала анода в катод в твёрдой фазе. Подтверждением последнего может служить наличие переходной зоны — переход от «белого слоя» (структура которого не выявляется обычными травителями) к основе. Эта зона не нагревается выше температуры плавления и не имеет непосредственного соприкосновения с окружающей средой. Поэтому причиной её образования могут быть термические воздействия импульсного разряда и диффузионное взаимопроникновение элементов анода и катода.

Характер взаимного распределения элементов в поверхностных слоях, полученных ЭЭЛ, свидетельствует о высокой подвижности атомов в кристаллической решётке металлов, подвергнутых воздействию искровых разрядов.

В работе [4] на основе исследований [5–7] предпринята попытка разработать модель массопереноса, позволяющую количественно описать экспериментальные концентрационные зависимости как при ЭЭЛ, так и при других видах импульсного воздействия на металлы.

Известно, что при контактном ЭЭЛ основная часть искрового разряда, эрозия и полярный перенос материала анода на катод происходят во время контакта электродов. Уже в контакте завершается процесс выброса материала анода в паровой и жидкой фазах (выброс происходит в течение длительности импульса тока $\tau_{и} = 50\text{--}150$

мкс и после его окончания продолжается ещё $2-3\tau_n$, время контакта электродов обычно составляет $0,6-2$ мс). Наличие контакта электродов не является препятствием для этих процессов, так как в пораженной искрой области «плотного» контакта не существует из-за высокого давления паров металлов. Следовательно, определённый промежуток времени ($\geq \tau_n$) на поверхности катода в зоне воздействия разряда на границе твёрдой фазы существует смесь из паров, возбуждённых атомов, ионов и жидкой фазы материала электродов, а также возникают высокие градиенты температур, давлений, термоупругие напряжения и идёт высокоскоростная пластическая деформация. Очевидно, в совокупности все эти экстремальные условия и являются причиной столь быстрого и глубокого проникновения атомов анода в катод.

Высокая подвижность атомов в кристаллической решётке металлов, подвергнутых воздействию импульсных разрядов, связывается с существенным вкладом в перенос вещества междоузельных атомов, генерируемых при выше названных экстремальных условиях. Одной из причин высокой подвижности атомов в твёрдой фазе может также явиться локальная деформация кристаллической решётки под воздействием высоких градиентов температуры и ударных волн. Последние сами по себе могут быть причиной переноса элементов на значительную глубину в твёрдой фазе [8].

Поглощённая энергия повышает запас энергии тела. Одновременно с поглощением энергии и изменением свойств тела происходит рассеяние поглощённой энергии и процессы «отжига» свойств, повышающих скорость протекания процессов, связанных с переносом массы (диффузии, ионной электропроводности, скорости химических реакций).

В результате ЭЭЛ происходит облучение, нагревание поверхностного слоя тела и его пластическая деформация, которые нарушают решётку, создают дефекты в виде вакантных узлов и внедрённых атомов. В правильных бездефектных структурах атомы располагаются в решётке, образуя систему с минимальной свободной энергией. Смещение атомов из равновесного положения нарушает порядок в решётке. Для получения таких нарушений затрачивается энергия, которая запасается в образовавшихся дефектах. Величина полной энергии системы будет больше минимальной, характерной для упорядоченной системы атомов, на величину запасённой энергии. Последняя определяется числом дефектов в решётке, их видом и является своеобразной мерой дефектности решётки.

На переход атома из узла решётки в соседний узел или междоузелье нужно затратить энергию, которую называют энергией активации процесса перехода атомов. В результате одновременного перемещения в теле большого числа вакансий и возникновения внедрённых атомов происходит понижение внутреннего трения и облег-

чение диффузии в материале. Торможение перемещения вакансий достигается введением в структуру примесей. Таким путём несовершенные металлические структуры получают высокую прочность. В данном случае они будут снижать эффективность ЭЭЛ [9].

Таким образом, во время ЭЭЛ происходит взаимодействие потоков частиц с веществом (облучение тела). Наличие этого взаимодействия является необходимым условием для передачи энергии из потока телу. Величина поглощённой энергии определяет эффективность электроэрозионной технологии. Если взаимодействие, а, следовательно, и поглощённая энергия малы, то и изменение свойств тела, т.е. технологический эффект, будет также незначительно.

Слой, сформированный на катоде, по глубине можно разделить на две зоны: зона, в которой происходит перемешивание жидких фаз материалов электродов («белый слой»), и зона, лежащая ниже зоны перемешивания, в которой элементы материала анода переносятся в твёрдой фазе (диффузионная зона). Распределение химических элементов электродов в каждой из этих зон определяется физическими процессами, отличающимися по своей природе, но зависящими от количества вводимой в тело энергии. Другими словами, от мощности разряда.

На основании экспериментальных исследований (см. рис. 1) установлено, что при ЭЭЛ между привесом катода (ΔP_k) и мощностью разряда (N_p), до периода насыщения, когда привес максимальный ($\Delta P_{кн} = \Delta P_{к.мак}$) в первом приближении существует экспоненциально возрастающая зависимость. В общем виде характер этой зависимости представлен на рис. 4, а. Следовательно, для обратной величины мощности разряда (N_p^{-1}) до периода насыщения,

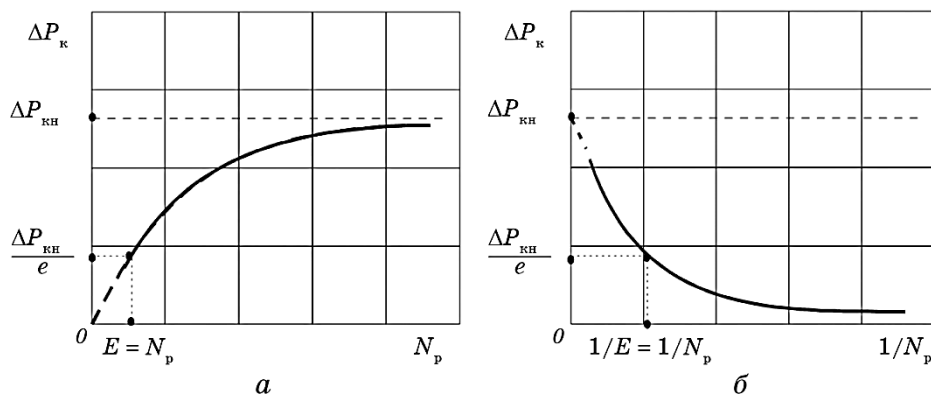


Рис. 4. Характер зависимости привеса катода от мощности разряда (а) и величины обратной мощности разряда (б).

Fig. 4. Dependence of cathode overweight on the discharge capacity (а) and inverse value of the discharge capacity (б).

когда $\Delta P_{\text{к}} = \Delta P_{\text{кн}} = \Delta P_{\text{к.макс}}$, существует экспоненциально убывающая зависимость, то есть $\Delta P_{\text{к}}$ является экспоненциально убывающей функцией обратной мощности разряда N_{p}^{-1} (рис. 4, б).

С ростом мощности разряда привес катода растёт тем сильнее, чем больше мощность активации массопереноса (E).

Исходя из экспериментальной зависимости $\Delta P_{\text{к}}$ от N_{p}^{-1} (убывающая экспонента), можно сделать вывод, что $\ln \Delta P_{\text{к}}$ пропорционален $(-N_{\text{p}})^{-1}$ и величине E , т.е.

$$\ln \Delta P_{\text{к}} \propto (-N_{\text{p}})^{-1} E. \quad (1)$$

Переходя от приближенного равенства к точному, имеем:

$$\Delta P_{\text{к}} = c e^{-E/N_{\text{p}}}, \quad (2)$$

где $c = \Delta P_{\text{кн}}$ ($\Delta P_{\text{кн}}$ — привес насыщения). Тогда

$$\Delta P_{\text{к}} = \Delta P_{\text{кн}} e^{-E/N_{\text{p}}}. \quad (3)$$

Зависимость (3) назовём уравнением массопереноса. Принимая в выражении (3)

$$E = N_{\text{p}}, \quad (4)$$

имеем

$$\frac{\Delta P_{\text{к}}}{\Delta P_{\text{кн}}} = e^{-1}. \quad (5)$$

Отсюда E — это физическая величина, равная такой мощности разряда, при которой $\Delta P_{\text{к}}$ в e раз меньше $\Delta P_{\text{кн}}$. Назовём её константой ЭЭЛ. Размерность E — $[E] = \text{Вт}$.

Для того чтобы перейти от привеса катода к приросту (под приростом подразумевается толщина слоя покрытия (линейный размер $\Delta h_{\text{с}}$, на который изменилось изделие в результате ЭЭЛ), необходимо уравнение массопереноса (3) записать в виде

$$\Delta h_{\text{с}} S \rho_{\text{с}} = \Delta h_{\text{сн}} S \rho_{\text{сн}} e^{-E/N_{\text{p}}}, \quad (6)$$

где S — площадь покрытия, $\rho_{\text{с}}$ и $\rho_{\text{сн}}$ — соответственно плотность легированного слоя и слоя насыщения $\Delta h_{\text{сн}}$ (т.е. слоя максимально достигаемого по толщине для данной пары материалов электродов — анода и катода).

После необходимых преобразований имеем:

$$\Delta h_{\text{с}} = \Delta h_{\text{сн}} \rho_{\text{сн}} \rho_{\text{с}}^{-1} e^{-E/N_{\text{p}}}. \quad (7)$$

Таким образом, при определении толщины слоя покрытия необходимо делать поправку на изменение его плотности.

Подставляя в (7) соотношение (4), имеем:

$$\Delta h_c = \Delta h_{\text{сн}} \frac{\rho_{\text{сн}}}{\rho_c} e^{-1}. \quad (8)$$

Отсюда

$$\frac{\Delta h_c}{\Delta h_{\text{сн}}} \frac{\rho_c}{\rho_{\text{сн}}} = e^{-1}. \quad (9)$$

Следовательно, E — это физическая величина, равная мощности разряда, при которой $\Delta h_c \rho_c$ в e раз меньше $\Delta h_{\text{сн}} \rho_{\text{сн}}$ (отметим, что при $\rho_{\text{сн}} = \rho_c$, $\Delta h_c / \Delta h_{\text{сн}} = e^{-1}$).

Массоперенос влияет не только на количество перенесённого материала с анода на катод и прирост катода, но и на шероховатость сформированного поверхностного слоя. Для данной пары электродов анода и катода шероховатость поверхностного слоя формируется при мощностях, отличных от мощности активации процесса массопереноса.

Между шероховатостью поверхностного слоя Ra и обратной величиной мощности разряда (N_p^{-1}) до периода насыщения, когда $\Delta Ra = \Delta Ra_{\text{н}} = \Delta Ra_{\text{max}}$, имеется экспоненциально убывающая зависимость. С ростом мощности разряда шероховатость поверхности увеличивается тем сильнее, чем больше мощность, затраченная на формирование шероховатости поверхности $E_{\Delta Ra}$.

Исходя из экспериментальной зависимости ΔRa от N_p^{-1} (убывающая экспонента), можно сделать вывод, что $\ln \Delta Ra$ пропорционален ($-N_p^{-1}$) и величине $E_{\Delta Ra}$, т.е.

$$\ln \Delta Ra \propto (-N_p)^{-1} E_{\Delta Ra}. \quad (10)$$

Переходя от приближенного равенства к точному, имеем:

$$\Delta Ra = c e^{-E_{\Delta Ra}/N_p}, \quad (11)$$

где $c = \Delta Ra_{\text{н}}$ ($\Delta Ra_{\text{н}}$ — шероховатость насыщения, т.е. наибольшая для данной пары электродов). Тогда

$$\Delta Ra = \Delta Ra_{\text{н}} e^{-E_{\Delta Ra}/N_p}. \quad (12)$$

Зависимость (12) назовём уравнением прогнозирования шероховатости поверхности при ЭЭЛ. Принимая в (12)

$$E_{\Delta Ra} = N_p, \quad (13)$$

имеем

$$\frac{\Delta Ra}{\Delta Ra_H} = e^{-1}. \quad (14)$$

Отсюда $E_{\Delta Ra}$ — это критическая величина, равная такой мощности разряда, при которой ΔRa в e раз меньше ΔRa_H . Назовём её константой уравнения прогнозирования шероховатости при ЭЭЛ. Размерность $E_{\Delta Ra}$ — $[E_{\Delta Ra}] = \text{Вт}$.

Режим ЭЭЛ, необходимый для осуществления массопереноса заданного количества вещества ($\Delta P_{кx}$), получения требуемого прироста (Δh_{cx}), необходимой шероховатости ΔRa_x покрытия, можно определить соответственно из уравнений (3), (7) и (12). Тогда

$$N_p = \frac{E}{\ln \frac{\Delta P_{кн}}{\Delta P_{кx}}}, \quad N_p = \frac{E}{\ln \frac{\Delta h_{сн} \rho_{сн}}{\Delta h_{cx} \rho_{cx}}}, \quad N_p = \frac{E_{Ra_H}}{\ln \frac{\Delta Ra_H}{\Delta Ra_x}}. \quad (15)$$

Для того чтобы найти константы уравнения массопереноса (3), — привес катода насыщения ($\Delta P_{кн}$) и мощность активации массопереноса (E), — необходимо измерить привес катода при различных мощностях разряда.

В таблице 1 приведены результаты измерения привеса катода при различных значениях мощности разряда в результате ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами с производительностью 0,7 см²/мин.

В соответствии с уравнением массопереноса (3) между логарифмом привеса катода и обратной величиной мощности разряда должна быть линейная связь. Построим графики зависимости $\ln \Delta P_{к}$ от N_p^{-1} для твёрдых износостойких (рис. 5) и для мягких антифрикционных (рис. 6) материалов. Все необходимые для этого данные сведены в табл. 2.

Как следует из графиков, зависимость логарифма привеса катода ($\ln \Delta P_{к}$) от величины обратной мощности разряда (N_p^{-1}) действительно линейная. Согласно уравнению массопереноса (3)

$$E = |\text{tg} \alpha|, \quad (16)$$

где α — угол наклона прямых к оси абсцисс.

Предэкспоненциальный фактор уравнения массопереноса (3) (привес насыщения ($\Delta P_{кн}$)) находим по отрезку, отсекаемому на оси ординат прямой, продолженной (экстраполированной) до значения абсциссы $N_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta P_{к} = \ln \Delta P_{кн}$ при $N_p^{-1} \rightarrow 0$).

Следует отметить, что для мягких антифрикционных металлов индия и олова зависимость (3) выполняется только в интервале значений мощности разряда 11,5–50,8 и 11,5–74,6 Вт соответственно.

ТАБЛИЦА 1. Зависимость привеса катода от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 1. Change of cathode overweight from the discharge capacity of steel 45 at the electrospark alloying with hard wear-resistant and soft antifricition materials.

№ реж.	С, мкФ	N_p , Вт	N_p^{-1} , (Вт) ⁻¹	Привес катода, г·10 ⁴ /см ²										
				In	Sn	Cu	Ti	W	Mn	V	Cr	Ni	ВК8	Т15К6
1	20	11,5	0,087	6	30	4	—	—	—	—	—	—	—	—
3		30,9	0,032	26	165	25	4	5	6	7	8	20	10	15
5		51,5	0,020	40	247	40	7,5	12,5	15	17	19	40	23	30
7		74,7	0,013	25	300	46	9,0	23,5	25	28	30	56	38	46
1	300	48,1	0,021	—	—	38	6,5	12	14,5	16	18	39	22	28
3		101,0	0,01	—	—	54	10	25	30	36	38	65	44	54
5		144,3	0,007	—	—	58	11	34	38	42	46	80	51	65
7		196,5	0,005	—	—	64	12	37	44	49	54	90	56	72

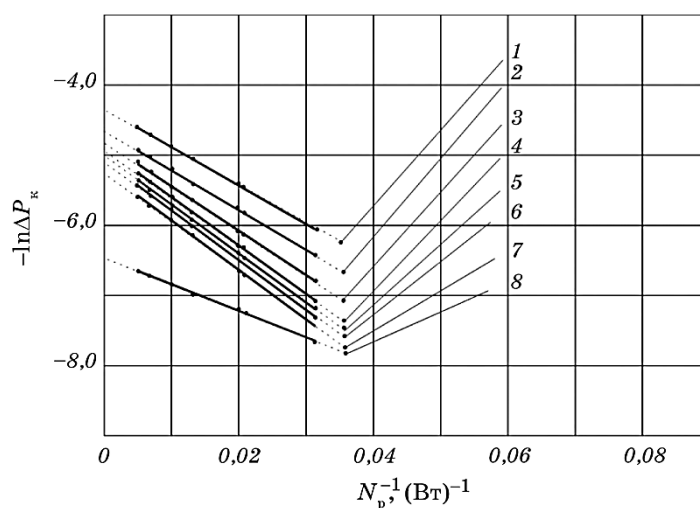


Рис. 5. Зависимость логарифма привеса катода от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими материалами: 1 — никель, 2 — Т15К6, 3 — ВК8, 4 — хром, 5 — ванадий, 6 — молибден, 7 — вольфрам, 8 — титан.

Fig. 5. Dependence of the cathode overweight logarithm on discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant materials: 1—nickel, 2—Т15К6, 3—VK8, 4—chrome, 5—vanadium, 6—molybdenum, 7—tungsten, 8—titanium.

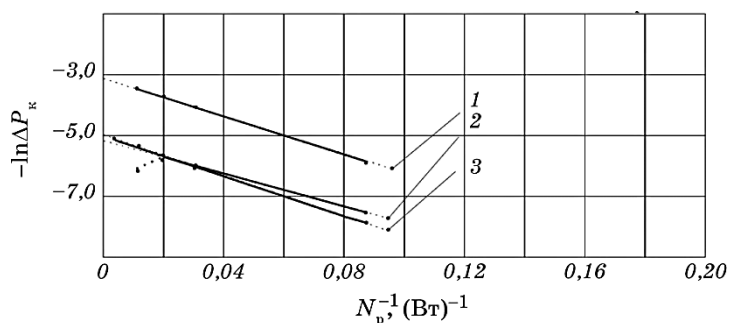


Рис. 6. Зависимость логарифма привеса катода от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 мягкими антифрикционными металлами: 1 — олово, 2 — индий, 3 — медь.

Fig. 6. Dependence of the cathode overweight logarithm on discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with soft antifriction metals: 1—tin, 2—indium, 3—copper.

ТАБЛИЦА 2. Зависимость логарифма привеса катода от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 2. Change of the cathode overweight logarithm from discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft antifriction materials.

№ реж.	С, мкФ	N _п , Вт	lnΔP _к										
			In	Sn	Cu	Ti	W	Mn	V	Cr	Ni	ВК8	Т15К6
1	20	0,087	-7,1	-5,8	-7,8	-	-	-	-	-	-	-	-
3		0,032	-5,9	-4,1	-5,9	-7,8	-7,6	-7,4	-7,3	-7,1	-6,2	-6,9	-6,5
5		0,020	-5,5	-3,7	-5,5	-7,2	-6,7	-6,5	-6,4	-6,3	-5,5	-6,1	-5,8
7		0,013	-5,9	-3,5	-5,3	-7,0	-6,1	-6,0	-5,9	-5,8	-5,2	-5,6	-5,4
1	300	0,021	-	-	-5,5	-7,3	-6,7	-6,5	-6,4	-6,3	-5,5	-6,1	-5,9
3		0,01	-	-	-5,2	-6,9	-6,0	-5,8	-5,6	-5,6	-5,0	-5,4	-5,2
5		0,007	-	-	-5,1	-6,8	-5,7	-5,6	-5,5	-5,4	-4,8	-5,3	-5,0
7		0,005	-	-	-5,0	-6,7	-5,6	-5,4	-5,3	-5,2	-4,7	-5,2	-4,9

Результаты расчёта мощности активации E , определённые двумя способами (первый, когда $E = N_p$, второй — при $E = |\operatorname{tg}\alpha|$) и предэкспоненциального множителя ($\Delta P_{\text{кн}}$) занесены в табл. 3.

Некоторое расхождение (0,2–3,9%) в значениях E , определённых различными способами, можно объяснить различием в погрешностях измерений. В целом сходимость результатов удовле-

ТАБЛИЦА 3. Расчёт мощности активации E и привеса насыщения $\Delta P_{\text{кн}}$ катода при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 3. Calculation of activation capacity E and cathode satiation over-weight $\Delta P_{\text{кн}}$ at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft antifriction materials.

Материал электрода	$E = \text{tg}\alpha $, Вт	$E = N_p$, Вт	%	$\Delta P_{\text{кн}}$, г·10 ⁴ /см ²
Титан	40,6	39,2	3,5	15
Вольфрам	74,2	71,4	3,9	51
Молибден	74,2	72,2	2,7	61
Ванадий	73,4	74,0	0,8	70
Хром	73,4	71,4	2,8	76
Никель	56,3	57,1	1,5	122
ВК8	67,1	66,6	0,8	80
T15K6	59,3	58,8	0,9	100
Индий	28,7	29,4	0,2	72
Олово	33,3	32,3	0,3	450
Медь	34,4	35,7	3,8	80

творительная.

Как следует из уравнения (7), между логарифмом прироста ЭЭЛ слоя катода и обратной величиной мощности разряда должна быть линейная зависимость. Для построения зависимости $\ln\Delta h_c$ от N_p^{-1} необходимо измерить прирост толщины слоя покрытия катода Δh_c при различных мощностях разряда (табл. 4). Кроме того, в табл. 4 представлены значения плотности материалов покрытий в зависимости от различных значений мощности разряда.

Построим графики зависимости $\ln\Delta h_c$ от N_p^{-1} для твёрдых износостойких материалов (рис. 7) и для мягких антифрикционных металлов (рис. 8). Все необходимые для этого данные сведены в табл. 5.

Как следует из графиков, зависимость $\ln\Delta h_c$ от N_p^{-1} линейная, значения тангенсов углов наклона прямых к оси абсцисс занесены в табл. 6. Согласно уравнению (7) $E = |\text{tg}\alpha|$.

Предэкспоненциальный фактор находим по отрезку, отсекаемому на оси ординат прямой, продолженной (экстраполированной) до значения абсциссы $N_p^{-1} = 0$ ($\ln\Delta h_c = \ln\Delta h_{\text{сн}}$ при $N_p^{-1} \rightarrow 0$).

Следует отметить, что для мягких антифрикционных металлов индия и олова зависимость (7) выполняется только в интервале значений мощности разряда 11,5–50,8 и 11,5–74,6 Вт соответственно.

Результаты нахождения константы E , определённой двумя спосо-

ТАБЛИЦА 4. Зависимость прироста толщины и плотности слоя покрытия от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 4. Change of the increment of coating thickness and covering density from discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft antifriction materials.

№ режима	C, мкФ	N_p^{-1} , (Вт) ⁻¹	Прирост толщины слоя Δh_c , мкм (числитель) Плотность ЭЭЛ слоя $\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³ (знаменатель)								
			In	Sn	Cu	W	Mn	Cr	Ni	ВК8	T15K6
1	20	0,087	$\frac{10}{0,6}$	$\frac{19}{1,58}$	$\frac{6}{0,67}$	-	-	-	-	-	-
3		0,032	$\frac{50}{0,52}$	$\frac{110}{1,5}$	$\frac{38}{0,67}$	$\frac{5}{1,0}$	$\frac{5,5}{1,09}$	$\frac{6,5}{1,23}$	$\frac{15}{1,33}$	$\frac{9}{1,11}$	$\frac{12}{1,25}$
5		0,020	$\frac{65}{0,62}$	$\frac{165}{1,5}$	$\frac{60}{0,67}$	$\frac{11}{1,14}$	$\frac{12,5}{1,2}$	$\frac{15}{1,27}$	$\frac{30}{1,33}$	$\frac{20}{1,15}$	$\frac{25}{1,2}$
7		0,013	$\frac{22}{1,14}$	$\frac{200}{1,5}$	$\frac{72}{0,64}$	$\frac{19}{1,24}$	$\frac{22}{1,14}$	$\frac{25}{1,2}$	$\frac{44}{1,27}$	$\frac{32}{1,19}$	$\frac{38}{1,21}$
1		0,021	-	-	$\frac{54}{0,7}$	$\frac{18}{0,67}$	$\frac{12}{1,2}$	$\frac{14,5}{1,24}$	$\frac{28}{1,39}$	$\frac{19}{1,16}$	$\frac{23,5}{1,19}$
3		0,01	-	-	$\frac{80}{0,68}$	$\frac{23,5}{1,06}$	$\frac{27}{1,11}$	$\frac{32}{1,19}$	$\frac{51}{1,27}$	$\frac{39}{1,19}$	$\frac{44}{1,23}$
5		0,007	-	-	$\frac{90}{0,64}$	$\frac{28}{1,21}$	$\frac{34}{1,12}$	$\frac{39}{1,18}$	$\frac{60}{1,33}$	$\frac{44}{1,16}$	$\frac{51}{1,27}$
7	0,005	-	-	$\frac{100}{0,64}$	$\frac{34}{1,09}$	$\frac{40}{1,1}$	$\frac{42}{1,29}$	$\frac{70}{1,29}$	$\frac{51}{1,1}$	$\frac{60}{1,2}$	

бами (первым, когда $E = N_p$, вторым — при $E = |\operatorname{tg}\alpha|$), и предэкспоненциального множителя $\Delta h_{\text{сн}}$ при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами см. в табл. 6.

Так как процессы прироста веса катода ΔP_k и изменения толщины слоя Δh_c протекают одновременно и являются производными массопереноса при ЭЭЛ, то величина мощности активации также должна быть единой, т.е. ($E_{\Delta P_k}$) должна равняться ($E_{\Delta h_c}$).

В таблице 7 представлены сводные данные констант уравнения массопереноса, необходимые для расчёта основных параметров ЭЭЛ слоя (количества перенесённого материала ΔP_k и увеличения толщины легируемого слоя Δh_c).

Некоторое расхождение в значениях $E_{\Delta P_k}$ и $E_{\Delta h_c}$ (0,4–1,7%) можно объяснить различием в погрешностях измерения привеса образцов и толщины слоя. Это естественно, так как толщина слоя опре-

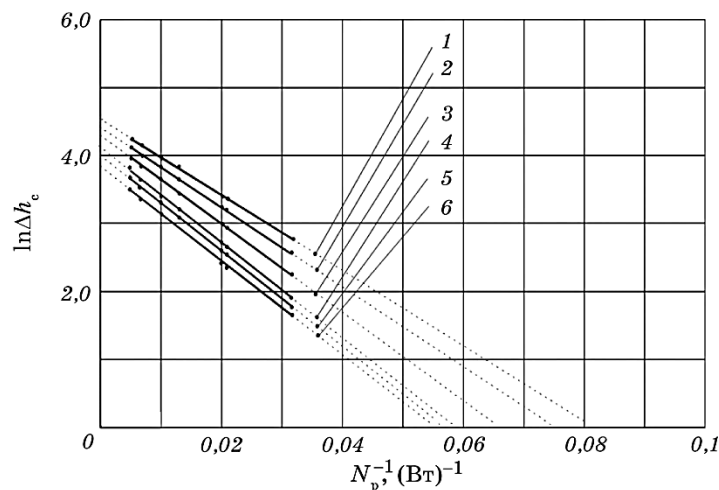


Рис. 7. Зависимость логарифма прироста толщины слоя от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими материалами: 1 — никель, 2 — Т15К6, 3 — ВК8, 4 — хром, 5 — молибден, 6 — вольфрам.

Fig. 7. Dependence of increment of coating thickness logarithm on discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant materials: 1—nickel, 2—T15K6, 3—VK8, 4—chrome, 5—molybdenum, 6—tungsten.

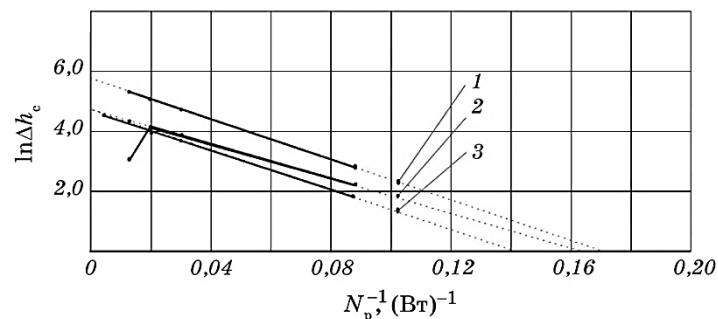


Рис. 8. Зависимость логарифма прироста толщины слоя от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 мягкими антифрикционными металлами: 1 — олово, 2 — индий, 3 — медь.

Fig. 8. Dependence of increment of coating thickness logarithm on discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with soft antifriction metals: 1—tin, 2—indium, 3—copper.

деляется по сугубо локальной методике измерения микрометром наиболее выступающих вершин шероховатости покрытия и, тем самым, невозможностью получения усреднённого результата.

ТАБЛИЦА 5. Зависимость логарифма прироста толщины слоя от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 5. Change of increment of coating thickness logarithm from the discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft antifriction materials.

№ режима	C, мкФ	$N_p^{-1}, (Вт)^{-1}$	$\ln \Delta h_c$									
			In	Sn	Cu	W	Mn	Cr	Ni	ВК8	T15K6	
1	20	0,087	2,3	2,9	1,8	–	–	–	–	–	–	–
3		0,032	3,9	4,7	3,6	1,6	1,7	1,85	2,7	2,2	2,48	
5		0,020	4,2	5,1	4,1	2,45	2,55	2,7	3,4	3,0	3,20	
7		0,013	3,1	5,3	4,3	2,95	3,05	3,2	3,8	3,45	3,6	
1	300	0,021	–	–	4,0	2,9	2,5	2,65	3,35	2,9	3,15	
3		0,01	–	–	4,4	3,15	3,3	3,45	3,95	3,65	3,80	
5		0,007	–	–	4,5	3,35	3,5	3,65	4,10	3,8	3,95	
7		0,005	–	–	4,6	3,5	3,65	3,75	4,25	3,95	4,09	

ТАБЛИЦА 6. Результаты расчёта мощности активации (E) и прироста толщины слоя (Δh_{ch}) при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 6. The calculation results of activation capacity (E) and increment of coating thickness (Δh_{ch}) at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft antifriction materials.

Материал электрода	$E_{\Delta Ra} = \operatorname{tg} \alpha , Вт$	$E = N_p, Вт$	%	$\Delta h_{ch}, мкм$
Вольфрам	71,9	73,0	1,5	49
Молибден	73,0	74,1	1,5	54
Хром	71,9	71,4	0,7	64
Никель	56,5	55,6	1,6	90
ВК8	65,6	66,7	1,5	72
T15K6	59,4	60,6	2,0	80
Индий	29,0	29,4	1,4	122
Олово	32,7	33,3	1,9	330
Медь	34,9	35,7	2,3	122

ТАБЛИЦА 7. Сводные данные констант уравнения массопереноса при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 7. Summary data of constants of mass transfer equation for the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft antifricition materials.

Материал электрода	$E_{\Delta P_k}$, Вт	$E_{\Delta h_c}$, Вт	%	$\frac{\Delta P_{кн} \cdot 10^4}{\Gamma/\text{см}^2}$	$\Delta h_{сн}$, мкм	$\rho_{сн} \cdot 10^{-3}$, кг/м ³
Вольфрам	72,8	72,5	0,4	51	49	1,04
Молибден	73,2	73,6	0,5	61	54	1,13
Хром	72,4	71,7	0,9	76	64	1,19
Никель	56,7	56,1	1,0	122	90	1,36
ВК8	66,9	66,2	1,0	80	72	1,11
T15K6	59,0	60,0	1,7	100	80	1,25
Индий	29,0	29,2	0,7	72	122	0,59
Олово	32,8	33,0	0,6	450	330	1,36
Медь	35,1	35,3	0,5	80	122	0,66

Используя выше приведённую методику, можно определить константы уравнения массопереноса для любых материалов пар электродов.

Для построения зависимости $\ln \Delta Ra$ от N_p^{-1} необходимо измерить шероховатость покрытия при различных мощностях разряда ЭЭЛ (табл. 8).

Все необходимые данные для построения графиков зависимости $\ln \Delta Ra$ от N_p^{-1} для твёрдых износостойких (рис. 9) и для мягких антифрикционных металлов (рис. 10) приведены в табл. 9.

Как следует из графиков, зависимость $\ln \Delta Ra$ от N_p^{-1} линейная, значения тангенсов углов наклона прямых к оси абсцисс занесены в табл. 10. Предэкспоненциальный фактор находим по отрезку, отсекаемому на оси ординат прямой, продолженной (экстраполированной) до значения абсциссы $N_p^{-1} = 0$ ($\ln \Delta Ra = \ln \Delta Ra_n$ при $N_p^{-1} \rightarrow 0$).

Результаты нахождения констант уравнения прогнозирования шероховатости $E_{\Delta Ra}$, определённых двумя способами (первый, когда $E_{\Delta Ra} = N_p$, второй — при $E_{\Delta Ra} = |\text{tg} \alpha|$) и предэкспоненциального множителя ΔRa_n при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами, занесены в табл. 10.

Сводные данные констант ЭЭЛ, необходимых для расчёта параметров качества поверхностного слоя, приведены в табл. 11.

На основании выше предложенной математической модели (уравнения (1)–(16)) и методики определения констант уравнений

ТАБЛИЦА 8. Зависимость шероховатости покрытия от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 8. Change of surface roughness from the discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft antifric-tion materials.

№ режима	C, мкФ	$N_p^{-1}, (\text{Вт})^{-1}$	Шероховатость поверхности ΔRa , мкм					
			In	Sn	Cu	W	Cr	ВК8
1	20	0,087	0,6	0,7	0,8	1,7	1,6	1,5
3		0,032	0,9	1,0	1,9	5,4	4,2	3,8
5		0,020	0,95	1,1	2,2	6,0	4,9	4,5
7		0,013	1,0	1,2	2,7	8,1	5,5	5,2
1	300	0,021	–	–	2,1	6,6	4,7	4,9
3		0,01	–	–	2,8	9,0	5,9	5,4
5		0,007	–	–	3,0	9,4	6,2	5,9
7		0,005	–	–	3,2	10,5	6,5	6,2

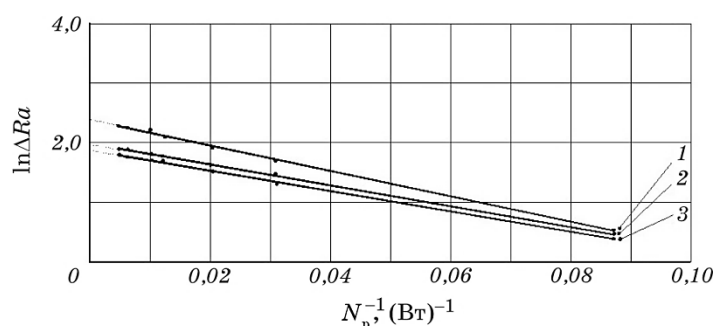


Рис. 9. Зависимость $\ln \Delta Ra$ от N_p^{-1} при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими материалами: 1 — вольфрам, 2 — твёрдый сплав ВК8, 3 — хром.

Fig. 9. Dependence of $\ln \Delta Ra$ on N_p^{-1} at electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant materials: 1—tungsten, 2—hard alloy VK8, 3—chrome.

массопереноса и прогнозирования шероховатости поверхности покрытия, проиллюстрированных на примере ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами, можно составить алгоритм, позволяющий определять основные технологические параметры ЭЭЛ слоя для любых материалов легирующего и легируемого электродов.

Суть алгоритма состоит в следующем.

1. Экспериментально измеряется привес ΔP_k и прирост Δh_c като-

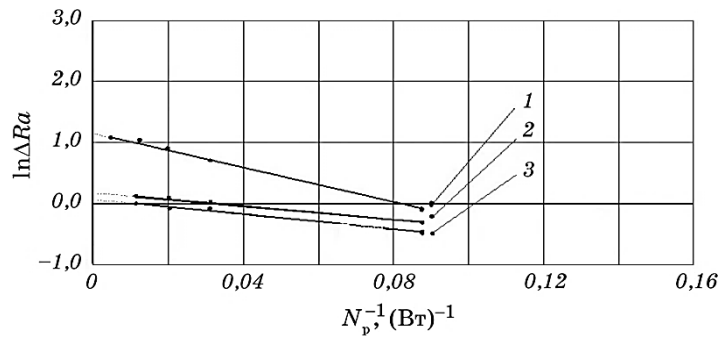


Рис. 10. Зависимость $\ln\Delta Ra$ от N_p^{-1} при ЭЭЛ стали 45 мягкими антифрикционными материалами: 1 — индий, 2 — олово, 3 — медь.

Fig. 10. Dependence of $\ln\Delta Ra$ on N_p^{-1} at electrospark alloying of steel 45 with soft antifriction metals: 1—indium, 2—tin, 3—copper.

ТАБЛИЦА 9. Зависимость логарифма шероховатости поверхности покрытия от мощности разряда при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 9. Change of surface roughness logarithm from the discharge capacity at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft anti-friction materials.

№ режима	С, мкФ	N_p^{-1} , (Вт) ⁻¹	$\ln\Delta Ra$					
			In	Sn	Cu	W	Cr	ВК8
1	20	0,087	-0,51	-0,36	-0,22	0,53	0,47	0,4
3		0,032	-0,1	0	0,65	1,70	1,45	1,35
5		0,020	-0,05	0,12	0,80	1,95	1,60	1,50
7		0,013	0	0,18	1,0	2,1	1,7	1,65
1	300	0,021	-	-	0,77	1,90	1,55	1,60
3		0,01	-	-	1,05	2,20	1,78	1,70
5		0,007	-	-	1,10	2,25	1,83	1,78
7		0,005	-	-	1,16	2,35	1,87	1,82

да, а также шероховатость покрытия ΔRa при различных мощностях разряда N_p .

2. Строятся графики зависимости $\ln\Delta P_k$, $\ln\Delta h_c$ и $\ln\Delta Ra$ от N_p^{-1} .

3. Определяется мощность активации процесса массопереноса E и критическая мощность $E_{\Delta Ra}$ как $|\operatorname{tg}\alpha|$, где α — угол наклона прямых зависимостей $\ln\Delta P_k$, $\ln\Delta h_c$ и $\ln\Delta Ra$ от N_p^{-1} к оси абсцисс.

4. По отрезку, отсекаемому на оси ординат прямой, экстраполированной до значения абсциссы $N_p^{-1} = 0$ ($\ln\Delta P_k = \ln\Delta P_{кн}$, $\ln\Delta h_c =$

$= \ln \Delta h_{\text{сн}}, \ln \Delta Ra = \ln \Delta Ra_{\text{н}}$ соответственно, при ЭЭЛ твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами), находятся значения $\Delta P_{\text{кн}}, \Delta h_{\text{сн}}$ и $\Delta Ra_{\text{н}}$.

5. Согласно уравнению (15) определяется мощность разряда (режим установки ЭЭЛ), необходимая для получения требуемого параметра качества покрытия (привеса, прироста толщины слоя, шероховатости).

ТАБЛИЦА 10. Результаты расчёта мощности активации $E_{\Delta Ra}$ и максимальной шероховатости слоя $\Delta Ra_{\text{н}}$ при ЭЭЛ стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 10. The calculation results of activation capacity $E_{\Delta Ra}$ and maximal surface roughness $\Delta Ra_{\text{н}}$ at the electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft antifriction materials.

Материал электрода	$E_{\Delta Ra} = \text{tg}\alpha $, Вт	$E_{\Delta Ra} = N_p$, Вт	%	$\Delta Ra_{\text{н}}$, мкм
Вольфрам	20,9	21,1	1,0	11,5
Хром	17,2	18,3	1,0	6,7
ВК8	17,6	18,4	1,0	7,3
Индий	6,4	6,9	1,1	1,1
Олово	7,0	7,5	1,1	1,3
Медь	16,9	17,4	1,0	3,5

ТАБЛИЦА 11. Сводные данные констант ЭЭЛ при легировании стали 45 твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.

TABLE 11. Summary data of constants electrospark alloying of steel 45 with hard wear-resistant and soft antifriction materials.

Материал электрода	$E_{\Delta P_k}$, Вт	$E_{\Delta h_c}$, Вт	$\Delta P_{\text{кн}} \cdot 10^4$, г/см ²	$\Delta h_{\text{сн}}$, мкм	$E_{\Delta Ra}$, Вт	$\Delta Ra_{\text{н}}$, мкм
Вольфрам	72,8	72,5	51	49	21,0	11,5
Молибден	73,2	73,6	61	54	–	–
Хром	72,4	71,7	76	64	17,7	6,7
Никель	56,7	56,1	122	90	–	–
ВК8	66,9	66,2	80	72	18,0	7,3
T15K6	59,0	60,0	100	80	–	–
Индий	29,0	29,2	72	122	6,7	1,1
Олово	32,8	33,0	450	330	7,3	1,3
Медь	35,1	35,3	80	122	17,2	3,5

3. ВЫВОДЫ

1. На основании анализа результатов экспериментальных исследований предложены математические модели (уравнения массопереноса и прогнозирования шероховатости поверхности покрытия), позволяющие по энергетическим параметрам установки ЭЭЛ определять основные технологические параметры качества сформированного покрытия: количество перенесённого с анода на катод материала ΔP_k , увеличение толщины слоя Δh_c и шероховатость поверхности ΔRa .
2. Разработана методика определения констант уравнений массопереноса и прогнозирования шероховатости поверхности покрытия при ЭЭЛ твёрдыми износостойкими и мягкими антифрикционными материалами.
3. Предложен алгоритм, позволяющий прогнозировать энергетические параметры ЭЭЛ для формирования покрытия с требуемыми технологическими параметрами (ΔP_k , Δh_c , ΔRa).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1611 (2016).
2. А. Д. Верхотуров, *Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании* (Владивосток: Дальнаука: 1995).
3. С. И. Смагин, В. Д. Власенко, Ю. И. Мулин, *Вычислительные технологии*, **14**, № 3: 79 (2009).
4. А. Е. Гитлевич, А. И. Михайлюк, В. В. Михайлов, *Электронная обработка материалов*, № 3: 12 (1995).
5. Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, Д. С. Герцрикен, *ДАН СССР*, **239**, № 2: 312 (1978).
6. Ю. И. Бабей, М. Е. Гуревич, Е. Л. Докторович, *Физико-химическая механика материалов*, № 2: 76 (1979).
7. Д. С. Герцрикен, В. П. Кривко, Л. Н. Лариков, *Физика и химия обработки материалов*, № 4: 154 (1979).
8. А. Н. Бекренев, А. В. Камашев, В. А. Путилин, *Письма в ЖТФ*, **19**, №13: 14 (1992).
9. В. Б. Тарельник, *Управление качеством поверхностных слоёв деталей комбинированным электроэрозионным легированием* (Сумы : МакДен: 2002).

REFERENCES

1. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, and M. Ya. Dovzhyk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 12: 1611 (2016).
2. A. D. Verkhotur, *Formirovanie Poverkhnostnogo Sloya Metallov pri Elektroiskrovom Legirovanii* [Formation of Surface Layer of Metals at Electrospark Alloying] (Vladivostok: Dalnauka: 1995) (in Russian).

3. S. I. Smagin and V. D. Vlasenko, *Vychislitelnye Tekhnologii*, **14**, No. 3: 79 (2009) (in Russian).
4. A. E. Gitlevich, A. I. Mikhailyuk, and V. V. Mikhailov, *Elektronnaya Obrabotka Materialov*, No. 3: 12 (1995) (in Russian).
5. L. N. Larikov, V. M. Falchenko, and D. S. Gertsriken, *DAN SSSR*, **239**, No. 2: 312 (1978) (in Russian).
6. Yu. I. Babey, M. E. Gurevich, and E. L. Doktorovich, *Fiziko-Khimicheskaya Mekhanika Materialov*, No. 2: 76 (1979) (in Russian).
7. D. S. Gertsriken, V. P. Krivko, and L. N. Larikov, *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, No. 4: 154 (1979) (in Russian).
8. A. N. Bekrenev, A. V. Kamashev, and V. A. Putilin, *Pisma v ZhTF*, **19**, No. 13: 14 (1992) (in Russian).
9. V. B. Tarelyuk, *Upravlenie Kachestvom Poverkhnostnykh Sloev Detaley Kombinirovannym Elektroerozionnym Legirovaniem* [Quality Control of Surface Layers of Parts by Combined Electrospark Alloying Method] (Sumy: MakDen: 2002) (in Russian).