

комплексном влиянии на качество наплавленного слоя металла поверхности и зависит: от количества вводимой в расплав металла сварочной ванны металлопорошковой присадки, скорости подачи её в сварочную ванну, параметров последней и зоны введения присадки в расплав, а также от материала матричного слоя основного металла и технологических режимов процесса наплавки. Эти особенности, по мнению авторов, следует учитывать при разработке технологических процессов электродуговой наплавки в среде защитного газа с металлопорошковой присадкой. Применение предлагаемых технологических решений как в изготовительном, так и в восстановительном производствах машиностроения, позволит поднять качественный уровень защитно-упрочняющих металлоповерхностей деталей машин и механизмов, работающих в условиях интенсивного изнашивания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кудина, А. В. Технология формирования износо-коррозион-нстойких композиционных металлопокрытий электродуговой наплавкой с применением ультразвука // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки. – Мн.: изд-во БНТУ, 2009. – 22 с.
2. Спиридонов, Н. В. Влияние режимов и способов введения порошковой присадки на качество наплавленного слоя в среде углекислого газа / Н. В. Спиридонов, В. В. Кураш, А. В. Кудина, В. В. Хроленок // Вестник Белорусского национального технического университета. Мн.: изд-во БНТУ, 2007. – № 6. – С. 24–27.
3. Кураш, В. В. Восстановление изношенных трибоповерхностей деталей машин электродуговой наплавкой с металлопорошковой композицией / В. В. Кураш, А. В. Кудина, Ю. И. Титов, О. В. Солонович // Материалы Международной научно-практической конференции «Опыт, проблемы и перспективы развития технического сервиса в АПК» 15–18 апреля 2009г. в 2-ч., Ч.1., Мн.: изд-во УО БГАТУ, 2009. – с. 384–390
4. Спиридонов Н. В. Электродуговая наплавка металлоповерхностей колеблющимся электродом в среде защитного газа / Н. В. Спиридонов, А. В. Кудина, В. В. Кураш // Наука и техника. Мн.: изд-во БНТУ, 2013. № 4. – С. 3–8.
5. Кудина, А. В. Технологическое обеспечение качества и надёжности деталей узлов трения машин и механизмов. / А. В. Кудина, М. С. Капица, И. О. Сокоров, Н. В. Спиридонов // «МАШИНОСТРОЕНИЕ» Республиканский межведомственный сборник научных трудов. Выпуск 30. Мн.: БНТУ, 2017. – С. 138–142.

УДК 621.794

Синькевич Ю.В.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ПОЛИРОВАНИЯ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Приведено описание вероятностно-статистического метода для исследования механизма формирования профиля поверхности при электроимпульсном полировании металлов и сплавов. Показано, что коррелограмма профиля поверхности является композицией коррелограмм систематической и случайной составляющих профиля и позволяет получать характеристики, как совокупного профиля поверхности, так и*

*раздельно периодической и случайной составляющих. На основании анализа результатов расчета математического ожидания параметра Ra и параметров аппроксимации коррелограмм профиля поверхности установлен механизм и предложена геометрическая модель формирования профиля поверхности в условиях электроимпульсного полирования металлов и сплавов.*

В современном машиностроении большое внимание уделяется новым высокоэффективным методам финишной обработки, обеспечивающим наряду со снижением трудоемкости изготовления деталей повышение качества и эксплуатационных характеристик поверхности. Широкое применение коррозионностойких, жаропрочных, магнитных и других высоколегированных сталей и сплавов со специальными свойствами, обработка которых традиционными механическими методами затруднена или невозможна, вызывает необходимость использования в технологических процессах изготовления деталей физико-технических методов обработки, в частности электроимпульсного полирования (ЭИП). При обработке этими методами на поверхность оказывает воздействие комплекс физико-химико-механических процессов, формирующих топографию и профиль поверхности. Из-за сложности, синергизма и возможной самоорганизации одновременно протекающих на поверхности процессов изучение механизма формирования топографии при использовании физико-технических методов обработки в большинстве случаев затруднено.

Известно [1], что в структуру шероховатости обработанной поверхности входят как закономерно, так и случайно расположенные неровности. Систематическая составляющая профиля обусловлена факторами, постоянно действующими в процессе обработки, и представляет собой основные неровности, которые на поверхности расположены определенным, закономерным образом. Случайная составляющая образуется в результате воздействия различных нерегулярных технологических и физико-химических факторов и накладывается на поверхность основных неровностей профиля. Она имеет вероятностный характер и является реализацией случайной стационарной функции. Поэтому реальный профиль поверхности, полученный в результате обработки различными методами, представляет собой композицию систематической и случайной составляющих и описывается уравнением вида [1]

$$x(t) = x_{\beta}(t) + x_{\gamma}(t),$$

где  $x_{\beta}(t)$  – периодическая функция;  $x_{\gamma}(t)$  – нормальный эргодический стационарный процесс со средним значением равным нулю.

За периодическую функцию примем модель вида [1]

$$x_{\beta}(t) = A \cos(\omega t + \psi),$$

где  $A$  – детерминированная величина;  $\omega$  – циклическая частота;  $\psi$  – случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $[0; 2\pi]$ .

Для описания непрерывного в среднем квадратичном случайного стационарного процесса можно использовать корреляционную функцию вида [1]

$$K(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\lambda\tau} dF(\lambda),$$

где  $K(\tau)$  – корреляционная функция случайного стационарного процесса;  $F(\lambda)$  – спектральная функция процесса  $x_\gamma(t)$ ;  $\tau$  – разница аргументов процесса;  $\lambda$  – частота спектра.

Для статистической оценки корреляционной функции можно использовать уравнение [2]:

$$\hat{K}(\tau) = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} (y_i - \bar{y})(y_{i+\tau} - \bar{y}), \quad (1)$$

где  $\hat{K}(\tau)$  – статистическая оценка корреляционной функции  $K(\tau)$ ;  $n$  – количество измеренных точек реализации процесса;  $y_i$  – ордината  $i$ -ой точки;  $y_{i+\tau}$  – ордината  $i+\tau$  точки;  $\bar{y}$  – среднее арифметическое значение измеренных ординат.

Если спектральная функция  $F(\lambda)$  абсолютно непрерывна, то ее можно представить в виде [1]

$$F(\lambda) = \int_{-\infty}^{\lambda} s(\lambda) d\lambda,$$

где  $s(\lambda)$  – спектральная плотность процесса  $x_\gamma(t)$ .

Если известна корреляционная функция  $K(\tau)$ , то спектральная плотность  $s(\lambda)$  может быть найдена по формуле [1]:

$$s(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\lambda} e^{-i\lambda\tau} K(\tau) d\tau$$

При реализации стационарного процесса на конечном интервале  $[-L; L]$  статистической оценкой  $\hat{s}(\lambda)$  спектральной плотности  $s(\lambda)$  будет функция вида [1]

$$\hat{s}(\lambda) = \frac{1}{2\pi} \int_{-L}^L e^{-i\lambda\tau} \hat{K}(\tau) d\tau \quad (2)$$

Структурная формула корреляционной функции, учитывающая систематическую и случайную составляющие, имеет вид [3]

$$K(\tau) = K_\beta(\tau) + K_\gamma(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n A_i^2 \cos \frac{2\pi}{T_i} \tau + K_\gamma(\tau),$$

где  $K_\beta(\tau)$  – корреляционная функция систематической составляющей профиля поверхности;  $K_\gamma(\tau)$  – корреляционная функция случайной составляющей профиля;  $A_i$  – амплитуда  $i$ -ой гармоники профиля;  $T_i$  – период  $i$ -ой гармоники профиля.

Поскольку коррелограмма профиля поверхности, содержащего систематическую и случайную составляющие, является композицией коррелограмм систематической и случайной составляющих, то она позволяет получать характеристики, как совокупного

профиля поверхности, так и раздельно периодической и случайной составляющих [3]. Из того, что в корреляционной функции систематической составляющей  $K_{\beta}(\tau)$  амплитуды гармоник возводятся в квадрат, следует, что коррелограмма выделяет наиболее мощные гармоники профиля поверхности. При необходимости анализа маломощных гармоник профиля из корреляционного преобразования следует исключить наиболее мощную систематическую гармонику, приняв ее в качестве линии отсчета ординат профиля [4].

При анализе доли случайной составляющей в реальном профиле поверхности использовали коэффициент случайности профиля, который определяется по формуле [3]:

$$\gamma = \frac{Rq_{\gamma}^2}{Rq^2}, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – коэффициент случайности профиля поверхности;  $Rq$  – среднее квадратическое отклонение профиля;  $Rq_{\gamma}$  – среднее квадратическое отклонение случайной составляющей профиля.

При исследовании механизма формирования топографии и профиля поверхности в условиях ЭИП вероятностно-статистическим методом в качестве объектов для исследования вы брана углеродистая конструкционная сталь 10 и коррозионнотойкая сталь 20X13 в виде плоских образцов размером 40x20x3 мм. Поверхность образцов предварительно шлифовалась на плоскошлифовальном станке мод. ОШ 224 до уровней  $Ra$  1,3–1,4 мкм и  $Ra$  0,53–0,63 мкм. Образцы из стали 10 полировались в 2 %-ном водном растворе хлорида аммония, из стали 20X13 – в 6 %-ном водном растворе сульфата аммония при напряжении обработки  $300 \pm 5$  В и температуре электролита  $85 \pm 1$  °С. Продолжительность обработки задавалась в диапазоне от 1 до 15 мин и выдерживалась с точностью  $\pm 0,05$  мин. До и после ЭИП на профилографе профилометре Talysurf-5 (Rank Taylor Hob son, Англия) снимались профилограммы поверхностей и измерялись параметры шероховатости  $Ra$  и  $Rq$ .

Для автоматизированной компьютерной обработки профилограммы предварительно переводились в цифровой формат путем сканирования. С полученных оцифрованных изображений в программе Paint.NET v.3.35 удалялись линии сетки профилограмм и артефакты изображений. В результате, на оцифрованном изображении профилограммы оставалась только характерная для данного образца линия профиля поверхности. Для математической обработки полученных изображений и построения графиков использовался программный пакет MATLAB [5] и написанная в нем программа. Импортрование оцифрованных изображений профиля поверхности производилось с помощью Image Procecing Toolbox пакета MATLAB. В результате, изображение профиля поверхности трансформировалось в матрицу, размеры которой были равны размеру изображения в пикселях. Значения элементов матрицы соответствовали цвету пикселя: для черного цвета, т.е. для точек на линии профилограммы «0», для белого цвета, т.е. для фона профилограммы «1». На рис. 1 в качестве примера представлено оцифрованное изображение квадрата с проведенной диагональю, состоящее из девяти пикселей, и соответствующая ему матрица.



Рис. 1. Представление оцифрованного изображения квадрата (а) в матричном виде (б)

На точность расчетов параметров исследуемого профиля поверхности и построения коррелограмм, спектрограмм и сглаженных гистограмм большое влияние оказывает выбор линии для отсчета ординат профиля [3]. Для выделения из профилограммы собственно шероховатости и исключения влияния на точность расчетов волнистости и макроотклонений поверхности в зависимости от внешнего вида линии профиля поверхности в качестве линии для отсчета ординат профиля принималась либо прямая линия, параллельная направлению продольного перемещения щупа профилографа, либо наклонная прямая линия, либо сплайн, либо линия, описываемая совокупностью гармонических функций. Коэффициенты в уравнении наклонной прямой линии определялись по методу наименьших квадратов с помощью функции Polyfit пакета MATLAB. При построении сглаживающего сплайна использовался тип аппроксимации Smooth ing Spline пакета MATLAB. Для описания линии отсчета совокупностью гармонических функций использовался тип приближения Fourier пакета MATLAB – приближение данных отрезками ряда Фурье для  $1 \leq n \leq 8$ . Для последних двух методов параметры, влияющие на точность приближения, подбирались индивидуально для каждой профилограммы до приближения значения параметра  $Ra$ , рассчитанного по коррелограмме, к величине  $Ra$ , измеренной профилометром. По полученным матрицам производился отсчет ординат профиля поверхности относительно выбранных линий отсчета и рассчитывались значения корреляционной функции, спектральной плотности, сглаженной гистограммы профиля и параметра  $Ra$ . По результатам расчетов строились коррелограммы, спектрограммы и сглаженные гистограммы профиля исследуемой поверхности.

Построение коррелограмм профиля поверхностей выполнялось по методике, приведенной в [6]. Расчет значений корреляционной функции производился по формуле (1), преобразованной для обработки профилограмм [4]:

$$K(\tau) = K_{\beta}(\tau) + K_{\gamma}(\tau) = \frac{1}{l - \tau} \sum_0^{l-\tau} (y(x) - m_y)(y(x + \tau) - m_y), \quad (4)$$

где  $\tau$  – аргумент корреляционной функции, равный разности между абсциссами двух сечений профилограммы, мкм;  $l$  – длина профилограммы, мкм;  $y(x)$  – ордината точки  $x$  на профилограмме в выбранной системе координат, мкм;  $y(x + \tau)$  – ордината точки  $x + \tau$  на профилограмме в выбранной системе координат, мкм;  $m_y$  – среднее арифметическое значение ординат точек профилограммы, которое рассчитывалось по формуле:

$$m_y = \frac{\sum_{i=1}^n y_i(x)}{n},$$

где  $y_i(x)$  – ордината  $i$ -ой точки на профилограмме в выбранной системе координат, мкм;  $n$  – количество измеренных ординат точек профиля.

Значения  $\tau$  принимались равными  $0; \Delta x; 2\Delta x; \dots n\Delta x$ , где  $\Delta x$  представляет собой выбранный интервал на оси абсцисс профилограммы. При няли  $\Delta x=1$  пиксель. В нашем случае размер одного пикселя равен 84,67 мкм.

Спектральная плотность является функцией, описывающей распределение дисперсии неровностей профиля поверхности по частотам. Она показывает, какого рода неровности преобладают в исследуемом профиле. Ее основным достоинством по срав-

нению с коррелограммой является наглядность [3]. Спектральная плотность  $s(\omega)$  профиля поверхности представляет собой сумму спектральных плотностей систематической  $s_{\beta}(\omega)$  и случайной  $s_{\gamma}(\omega)$  составляющих профиля. При построении спектрограмм расчет значений спектральной плотности производился по формуле (2), преобразованной для обработки профилограмм [4]:

$$s(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_0^{2l/3} K(\tau) \cos(\omega\tau), \quad (5)$$

где  $K(\tau)$  – значение корреляционной функции в точке с абсциссой  $\tau$ ;  $\omega$  – частота неровностей в точке с абсциссой  $\tau$ , определяемая как

$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

где  $T$  – период неровностей в точке с абсциссой  $\tau$ , мкм.

Шаг изменения  $\tau$  и  $T$  при расчете значений спектральной плотности принят равным шагу изменения  $\tau$ , принятому при расчете коррелограмм.

Аппроксимация построенных коррелограмм производилась с помощью Curve Fitting Tool пакета MATLAB функцией, позволяющей учесть систематические неровности, как с большим, так и малым шагом, и имеющей вид [6]

$$K(\tau) = c^2 Ra^2 \left[ \gamma e^{-\alpha\tau} + \beta \cos \frac{2\pi}{T_{\beta}} \tau + \nu \cos \frac{2\pi}{T_{\nu}} \tau \right], \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент частотного состава случайных неровностей поверхности;  $\beta$  – коэффициент высот систематических неровностей с периодом  $T_{\beta}$ ;  $\nu$  – коэффициент высот систематических неровностей с периодом  $T_{\nu}$ ;  $c$  – коэффициент, зависящий от формы неровностей и закона их распределения по высоте.

Коэффициент  $\alpha$  определяет частотный состав случайных неровностей. Чем меньше значение  $\alpha$ , тем более плавны случайные неровности и тем больше расстояние между ними [3]. Коэффициенты  $\gamma$ ,  $\beta$  и  $\nu$  характеризуют вклад, вносимый соответствующими составляющими шероховатости поверхности в  $Ra^2$ , причем  $\gamma + \beta + \nu = 1$ . По соотношению этих коэффициентов можно судить о характере неровностей поверхности, а по динамике изменения  $T_{\beta}$ ,  $T_{\nu}$ ,  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$  и  $\nu$  – о механизме формирования профиля поверхности в условиях ЭИП.

На точность аппроксимации коррелограмм большое влияние оказывает выбор границ изменения параметров, который производился на основе анализа коррелограмм и спектрограмм поверхностей. По коррелограмме рассчитывались границы изменения параметров  $\beta$  и  $\gamma$ . За ориентировочные значения брались отношения  $K_{\beta}(0)$  и  $K_{\gamma}(0)$  к  $K(0)$ . С помощью спектрограммы определялись значения шагов, которые соответствовали двум наибольшим пикам. Меньший шаг характеризует высокочастотные, а больший шаг – низкочастотные гармоники систематических неровностей профиля [6].

Из (6) следует, что корреляционная функция  $K(\tau)$  при  $\tau=0$  связана с параметром шероховатости поверхности  $Ra$  выражением:

$$K(0) = c^2 Ra^2 \quad (7)$$

С учетом [1], разрешения оцифрованных изображений и вертикального увеличения профилограммы математическое ожидание параметра шероховатости  $Ra$  рассчитывалось по преобразованной формуле (7):

$$ERa = \frac{\sqrt{2K(0)}10^6}{\sqrt{\pi RBY}},$$

где  $ERa$  – математическое ожидание параметра шероховатости  $Ra$ , мкм;  $K(0)$  – значение корреляционной функции при  $\tau = 0$ ;  $R$  – разрешение оцифрованного изображения профилограммы,  $m^{-1}$  (в нашем случае  $R = 11811 m^{-1}$ );  $BY$  – вертикальное увеличение профилограммы.

После введения в программу численных данных производился расчет математического ожидания параметра  $Ra$  и параметров аппроксимации коррелограмм с доверительной вероятностью 95 %.

На основании анализа результатов исследования профиля поверхности вероятностно-статистическим методом можно предложить следующую геометрическую модель формирования профиля поверхности в условиях ЭИП. Моделирование выполним на примере сглаживания единичного выступа профиля, которое для удобства визуального восприятия графической информации по аналогии с профилограммой вы полным при вертикальном увеличении, значительно превышающем горизонтальное (рис. 2).

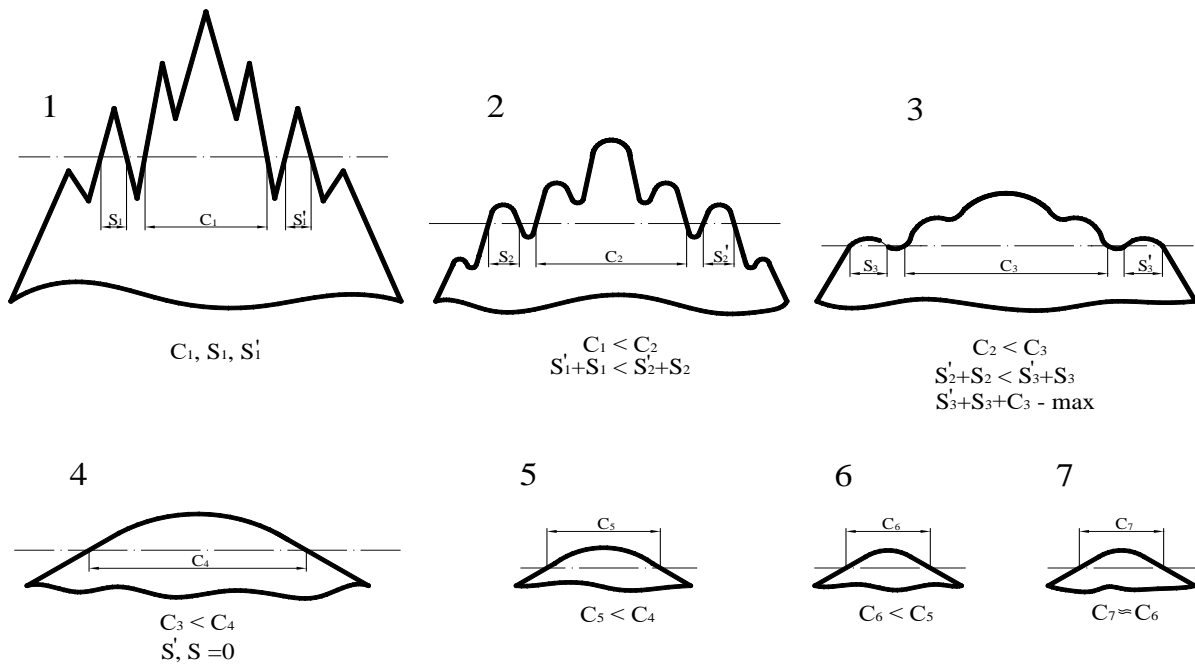


Рис. 2. Геометрическая модель сглаживания единичного выступа в процессе ЭИП:

1...7 – этапы сглаживания выступа профиля поверхности;

$C$  – ширина основного выступа;  $S$ ;  $S'$  – ширина местных выступов

Профиль исходной поверхности, сформированный в результате механической обработки, представляет собой композицию из различных по высоте и ширине основных выступов и впадин и местных выступов и впадин, расположенных на основных выступах и впадинах профиля. На рисунке 2 этап 1 композиции представлена в виде единичного исходного выступа. В процессе ЭИП анодное растворение основного и местных выступов происходит с равной вероятностью [7], в результате чего основной и местные выступы сглаживаются. Это приводит к постепенному увеличению ширины основного выступа на средней линии профиля поверхности и уменьшению угла наклона боковых граней выступа (этапы 1–3 на рис. 2). Продолжение обработки приводит к полному растворению местных выступов (этап 4 на рис. 2). При этом ширина основного выступа на средней линии профиля достигает максимального значения. Дальнейшая обработка способствует дополнительному сглаживанию выступа, уменьшению его высоты и ширины на средней линии профиля и угла наклона боковых граней (этапы 5–7 на рис. 2). Выступ так же, как и профиль поверхности становится гладким и пологим, что подтверждают экспериментальные данные, приведенные в [7]. Так, средний квадратичный угол наклона профиля исходной поверхности образца из стали 10 с  $Ra^{нач}$  1,30 и 0,78 мкм равен соответственно  $12^{\circ}24'26''$  и  $10^{\circ}45'28''$ . После ЭИП в течение 10 мин при температуре электролита  $65^{\circ}\text{C}$  средний квадратичный угол наклона профиля снижается соответственно до  $2^{\circ}10'34''$  и  $1^{\circ}29'22''$ .

При продолжении обработки наступает момент, когда средний квадратичный угол на клон профиля поверхности достигает минимально возможного значения, которое в данном случае определяется не столько средним квадратичным углом наклона боковых граней не полностью растворившихся выступов профиля, сколько средним квадратичным углом на клон профиля поверхности элементов микроструктуры сплава, проявившихся на полированной поверхности вследствие селективного анодного растворения структурных составляющих сплава (рис. 3 д, е).

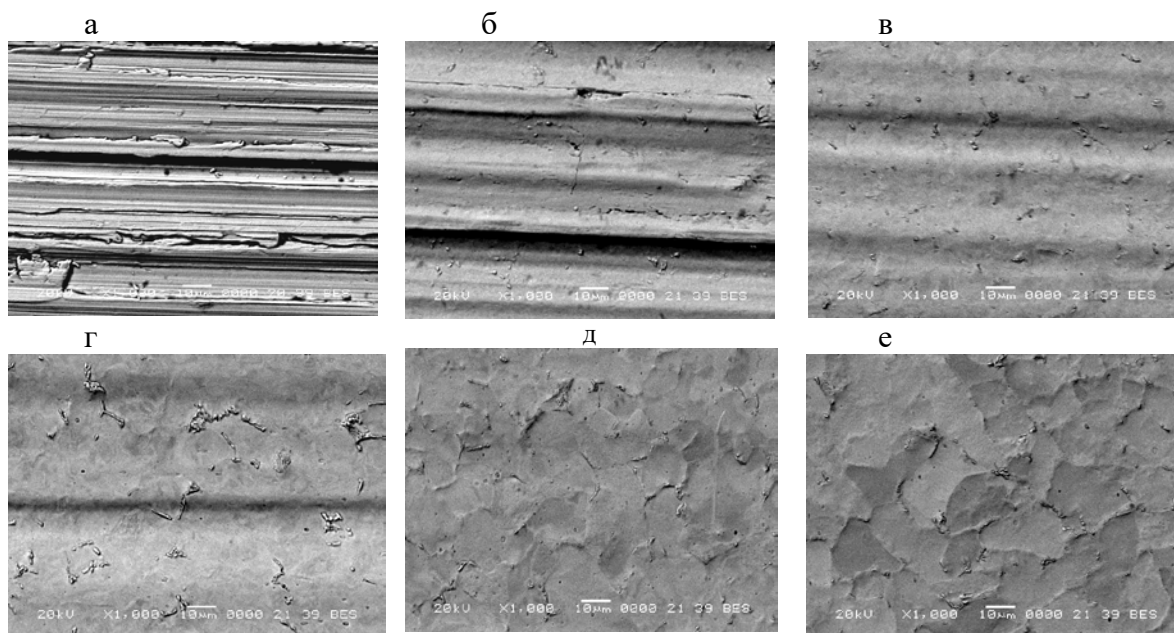


Рис. 3. Эволюция топографии в процессе ЭИП (x1000)  
 Продолжительность ЭИП, с:  
 исходная поверхность (а); 20 (б); 40 (в); 60 (г); 120 (д); 300 (е)

Парадоксальное, на первый взгляд, уменьшение ширины основного выступа на средней линии профиля поверхности, показанное на этапах 5–7 (рис. 2), можно объяснить следующим образом. В соответствии с ГОСТ 25142–82 средняя линия профиля



поверхности проводится таким образом, что в пределах базовой длины среднее квадратическое отклонение профиля до этой линии минимально. При уменьшении высоты основного выступа и угла наклона его боковых граней происходит смещение средней линии профиля к вершине выступа, что приводит к уменьшению его ширины на средней линии профиля. В пользу этого положения свидетельствуют экспериментальные данные о пропорциональном уменьшении высоты наибольшего выступа  $R_p$  и наибольшей высоты неровностей профиля  $R_{max}$ , представленные в [7]. Адекватность предложенной геометрической модели формирования профиля поверхности, а соответственно и топографии, в условиях ЭИП подтверждают фотографии поверхности образца из стали 10, представленные на рис. 3.

Фотографии наглядно показывают, что в условиях ЭИП сглаживание неровностей профиля поверхности происходит с равной вероятностью на выступах и во впадинах профиля с одно временным снижением высоты неровностей, увеличением радиусов округления выступов и впадин и уменьшением угла наклона граней профиля (рис. 3, *a–г*). Так же видно (рис. 3, *д; е*), что уровень минимально достижимой шероховатости поверхности ограничивается микроструктурой сплава, проявившейся на полированной поверхности вследствие селективного анодного растворения структурных составляющих сплава.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хусу, А. П. Шероховатость поверхностей: теоретико-вероятностный подход / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальмов; под ред. А. А. Первозванского. – М.: Наука, 1975. – 344 с.
2. Смирнов, Н.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Физмат гиз, 1959. – 436 с.
3. Витенберг, Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки / Ю. Р. Витенберг. – Л.: Судостроение, 1971. – 101 с.
4. Беляев, Г. С. Расчет и построение коррелограмм уплотняющих по верхностей деталей судовой арматуры / Г. С. Беляев [и др.] // Судостроение. – 1971. – № 6. – С. 46–49.
5. Ануфриев, И. Е. MATLAB 7 / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
6. Витенберг, Ю. Р. Оценка шероховатости с помощью корреляционных функций / Ю. Р. Витенберг // Вестник машиностроения. – 1969. – № 1. – С. 55–57.
7. Синькевич, Ю. В. Комплексный подход к изучению механизма сглаживания неровностей профиля поверхности и формирования топографии при электроимпульсном полировании / Ю. В. Синькевич // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. / Донецкий национ. техн. ун.-т. – Донецк, 2016. – Вып. 2 (53). – С. 109–118.

УДК 621.793

**Фролов И.С., Мрочек Ж.А., Фролов Ю.И.**

## **ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОКРЫТИЯ С ОСНОВОЙ ПРИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОМ НАПЫЛЕНИИ**

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

*Дана постановка задачи теплофизического моделирования формирования покрытия из плазменных потоков в вакууме. Приведен анализ тепловых моделей взаимодействия частицы покрытия с основой при плазменном напылении. Отмечено, что применение данных моделей к вакуумно-плазменным покрытиям требует учета особенностей формирования таких покрытий.*