

УДК 621.923.7

## ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНО ПОЛИРОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ

*Канд. техн. наук, доц. СИНЬКЕВИЧ Ю. В., инж. ГРИНЕВИЧ А. А.,  
канд. техн. наук ЯНКОВСКИЙ И. Н.*

*Белорусский национальный технический университет*

Шероховатость поверхности, являющаяся одной из основных геометрических характеристик качества поверхности, оказывает значительное влияние на эксплуатационные показатели детали [1]. Механизм формирования топографии поверхности при электроимпульсном полировании (ЭИП) достаточно сложен, включает в себя физические, химические, геометрические и технологические аспекты, которые взаимосвязаны и на сегодняшний день мало изучены.

В настоящее время существует несколько гипотез о механизме сглаживания микронеровностей поверхности в процессе ЭИП [2–8]. Они основываются на опыте электроэрозионной обработки и электрохимического полирования и сводятся к тому, что напряженность электриче-

ского поля на вершинах микровыступов обрабатываемой поверхности должна быть значительно выше по сравнению с микровпадинами. Поэтому, по мнению авторов, возникновение электрических разрядов происходит преимущественно на вершинах микровыступов. Формирование топографии поверхности в процессе полирования обеспечивается за счет избирательного электроэрозионного и электрохимического сглаживания микровыступов поверхности. Однако предложенные гипотезы, в том числе в части типов и механизмов электрических разрядов в парогазовой оболочке (ПГО) и ионного распыления оксидных слоев, не имеют ни экспериментального, ни теоретического обоснования. Эти гипотезы ошибочно базиру-

ются на том факте, что на профилограмме реальной поверхности микровыступы имеют островершинный вид. На самом деле этот эффект связан с различием в масштабах вертикального и горизонтального увеличения профилограммы и показан на рис. 1 [9].

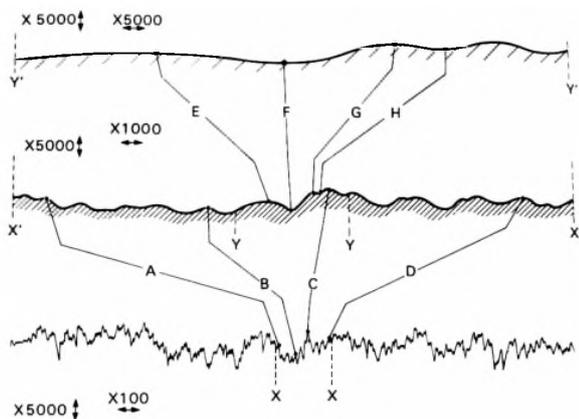


Рис. 1. Влияние горизонтального увеличения профилограммы на внешний вид профиля поверхности

**Постановка задачи.** Известно [9, 10], что в структуру шероховатости поверхности входят как закономерно, так и случайно расположенные неровности. Поэтому реальный профиль поверхности, полученный в результате ее обработки различными методами, представляет собой композицию систематической и случайной составляющих, а уравнение профиля, учитывающее оба вида неровностей, имеет вид [10]

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

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

Систематическая составляющая профиля обусловлена факторами, постоянно действующими в процессе обработки, и представляет собой основные микронеровности, которые на поверхности расположены определенным образом. Случайная составляющая образуется за счет воздействия различных нерегулярных технологических и физических факторов и накладывается на поверхность основных микронеровностей [9, 11]. Она имеет вероятностный характер и является реализацией случайной стационарной функции. В соответствии с теорией случайных функций под случайной стационарной функцией понимается такая функция,

которая изменяется примерно однородно и имеет вид непрерывных случайных колебаний около некоторого среднего значения, причем ни средняя амплитуда, ни характер этих колебаний существенно не изменяются с течением времени [12].

За периодическую функцию в данной работе принята модель вида [10]

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

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

Для описания случайного процесса в нашем случае будет достаточно определения корреляционной функции  $K(\tau)$  непрерывного в среднем квадратичном стационарного случайного процесса, которая по теореме Бигшофа–Хинчина может быть представлена в виде [10]

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

где  $F(\lambda)$  – вещественная неубывающая ограниченная функция;  $\tau$  – разница аргументов процесса;  $\lambda$  – частота спектра;  $i$  – мнимая единица.

Статистическая оценка корреляционной функции  $\hat{K}(\tau)$  находится по формуле [13]

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

где  $n$  – количество измеренных точек реализации процесса;  $y_i$  – ордината  $i$ -й точки;  $\bar{y}$  – среднее арифметическое измеренных ординат.

Функция  $F(\lambda)$  называется спектральной функцией процесса  $x(t)$ . Если  $F(\lambda)$  абсолютно непрерывна, то она представляется в виде [10]

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

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

Если известна корреляционная функция  $K(\tau)$ , то спектральная плотность  $s(\lambda)$  определяется по формуле [10]

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

Для оценки спектральной плотности  $s(\lambda)$  по реализации стационарного процесса на конечном интервале пользуются полученной оценкой корреляционной функции  $\widehat{K}(\tau)$ . Тогда статистической оценкой спектральной плотности  $\widehat{s}(\lambda)$  будет функция вида [10]

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

где  $2L$  – выбранная длина интервала реализации процесса.

Поскольку коррелограмма профиля поверхности, содержащего систематическую и случайную составляющие, является композицией коррелограмм систематической и случайной составляющих, то она позволяет получать характеристики как совокупного профиля, так и отдельно периодической и случайной составляющих. В этом случае структурная формула корреляционной функции имеет вид [12]

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

где  $K_{\beta}(\tau)$ ,  $K_{\gamma}(\tau)$  – корреляционные функции соответственно систематической и случайной составляющих профиля поверхности;  $A_i$ ,  $T_i$  – соответственно амплитуда и период  $i$ -й гармоники профиля.

Из того, что в корреляционной функции систематической составляющей  $K_{\beta}(\tau)$  амплитуды гармоник возводятся в квадрат, следует, что коррелограмма профиля поверхности выделяет более мощные гармоники. В случае, когда возникает необходимость анализа маломощных гармоник профиля, необходимо исключить из корреляционного преобразования наиболее мощную систематическую гармонику, приняв ее в качестве линии отсчета ординат профиля.

Для характеристики доли случайной составляющей в реальном профиле поверхности используется коэффициент случайности профиля  $\gamma$  [12]

$$\gamma = \frac{Rq_{\gamma}^2}{Rq^2},$$

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

Цель данной работы – исследование вероятностно-статистическими методами механизма формирования топографии поверхности в процессе ЭИП путем корреляционного преобразования профилограмм поверхности. В данной работе не рассматриваются механизм пробоя ПГО и его влияние на шероховатость поверхности.

**Объекты и методика исследований.** В качестве объектов исследования были выбраны углеродистая конструкционная сталь 10 (ГОСТ 1050) и коррозионно-стойкая сталь 20Х13 (ГОСТ 5632) в виде плоских образцов размерами 40×20×3 мм, которые предварительно шлифовались до уровня  $Ra$  1,3–1,4 мкм и 0,53–0,63 мкм. Образцы из стали 10 полировали в 2%-м водном растворе хлористого аммония, из стали 20Х13 – в 6%-м водном растворе сернокислого аммония при напряжении  $300 \pm 5$  В и температуре электролита  $85 \pm 1$  °С. Время обработки выдерживалось с точностью  $\pm 1$  с. До и после ЭИП на профилографе-профилометре Talysurf-5 фирмы Rank Taylor Hobson (Англия) снимали профилограммы поверхности образцов и измеряли параметры шероховатости  $Ra$  и  $Rq$ . На рис. 2 и 3 представлены профилограммы поверхности образцов из сталей 10 и 20Х13 с исходной шероховатостью поверхности соответственно  $Ra$  0,63 и 0,53 мкм.

Для автоматизированной компьютерной обработки профилограммы предварительно переводили в цифровой формат путем сканирования. С полученных оцифрованных изображений в программе Paint.NET v. 3.35 удалялись линии сетки профилограмм и артефакты изображений. Таким образом, перед анализом на изображении профилограммы оставался только характерный для данного образца участок линии профиля поверхности. Для математической обработки полученных изображений и построения графиков использовали программный пакет MatLab [14] и написанную в пакете программу. Импортирование оцифрованных изображений профиля производилось с помощью MatLab Image Processing Toolbox [14]. В результате изображение профиля поверхности

трансформировалось в матрицу, размеры которой равны размеру изображения в пикселях. После получения матрицы по ней последовательно производили отсчет ординат профи-

ля поверхности относительно выбранной линии отсчета, расчет значений корреляционной функции и сглаженной гистограммы профиля, а также параметра  $Ra$ .

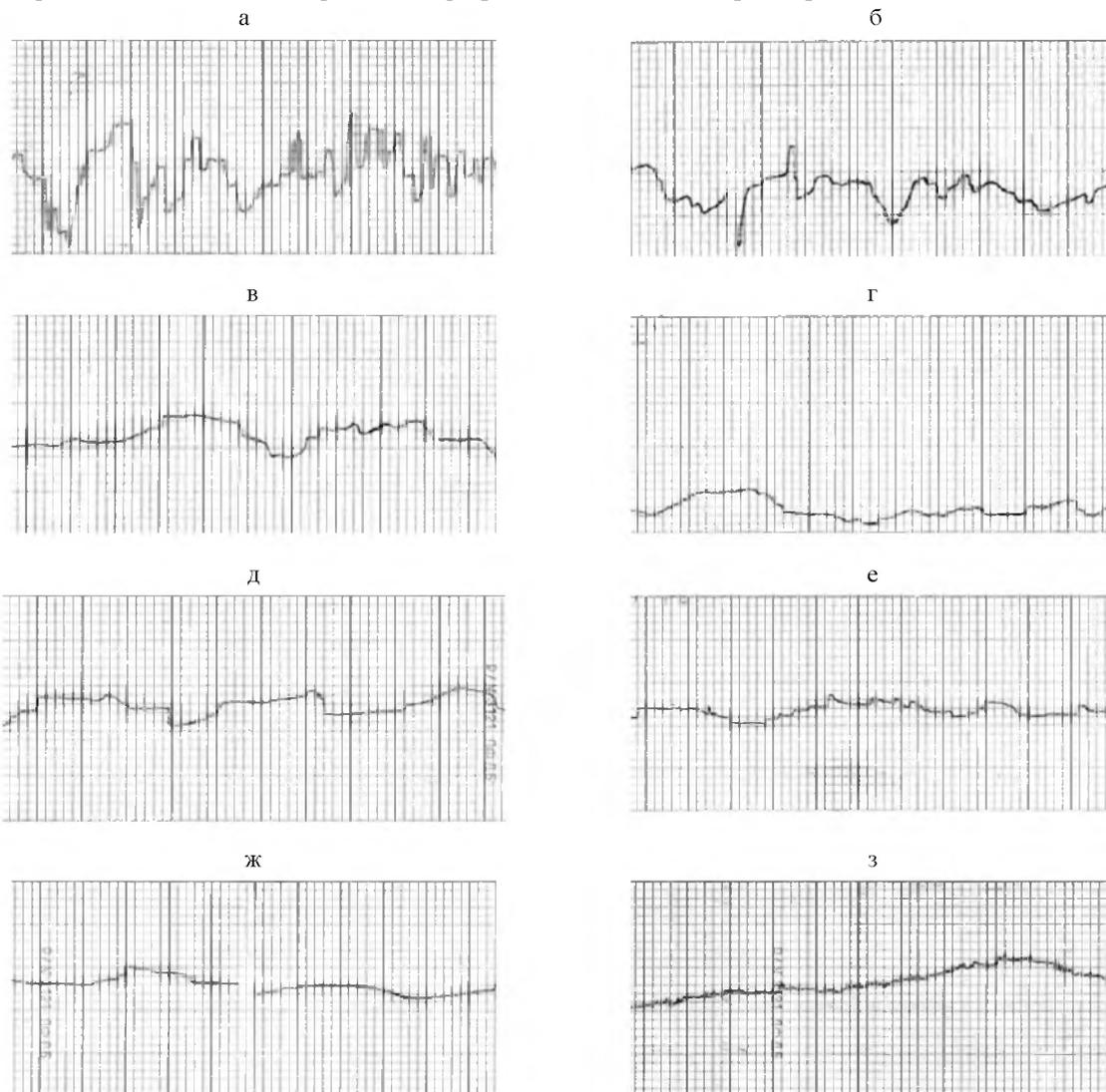


Рис. 2. Профилограммы поверхности образцов из стали 10 после ЭИП в течение, мин: а – 0 (исходная шероховатость); б – 1; в – 2; г – 3; д – 5; е – 7; ж – 10; з – 15 (ГУ × 100; ВУ × 5000)

На точность расчетов параметров исследуемого профиля и построения коррелограмм большое влияние оказывает выбор линии для отсчета ординат профиля. В зависимости от вида линии профиля для выделения из профилограммы собственно шероховатости и исключения влияния на результаты расчетов волнистости и макроотклонений поверхности в качестве линии для отсчета ординат принималась прямая  $L$ , параллельная направлению продольного перемещения щупа профилографа,

наклонная прямая  $LRL$ , сплайн  $SPL$  или линия  $FTW$ , описываемая совокупностью гармонических функций. Коэффициенты в уравнении наклонной прямой определяли по методу наименьших квадратов с помощью функции  $Polyfit$  пакета  $MatLab$  [14]. При построении сглаживающего сплайна использовали тип аппроксимации  $Smoothing Spline$  пакета  $MatLab$  [14]. При описании линии отсчета совокупностью гармонических функций использовали тип приближения  $Fourier$  пакета  $MatLab$  [14] – прибли-

жение данных отрезками ряда Фурье для  $1 \leq n \leq 8$ . Параметры, влияющие на точность приближения для последних двух методов, подбирали индивидуально для каждой профи-

лограммы до приближения значения параметра  $Ra$ , рассчитанного по коррелограмме к величине, измеренной профилометром.

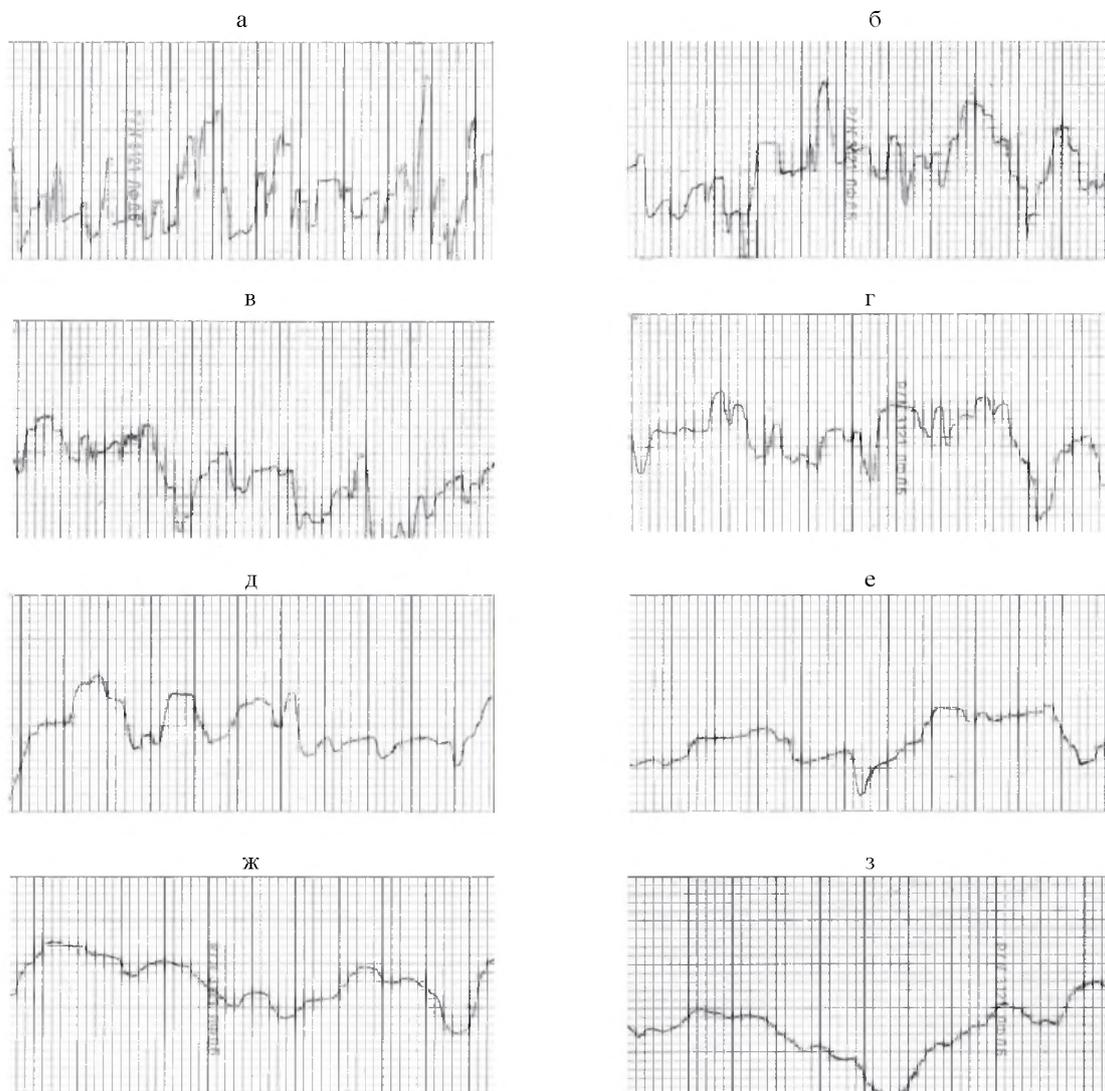


Рис. 3. Профилограммы поверхности образцов из стали 20Х13 после ЭИП в течение, мин: а – 0 (исходная шероховатость); б – 1; в – 2; г – 3; д – 5; е – 7; ж – 10; з – 15 (ГУ × 100; ВУ × 5000)

**Построение коррелограмм и спектрограмм.** Построение коррелограмм профиля поверхностей выполняли по методике [15]. Расчет значений корреляционной функции производили по преобразованной для обработки профилограмм формуле (1) [16]

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

где  $\tau$  – переменная разность между абсциссами двух сечений профилограммы, мкм;  $l$  – длина профилограммы, мкм;  $y(x)$ ;  $y(x + \tau)$  – ординаты профилограммы в выбранной системе координат, мкм;  $m_y$  – среднее арифметическое значение ординат профилограммы, мкм, которое рассчитывалось по формуле:

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

где  $n$  – количество измеренных ординат.

Значения  $\tau$  последовательно принимались равными 0; 1; 2; ...;  $\Delta x$ . Величина  $\Delta x$  представляет собой выбранный интервал на оси абсцисс профилограммы, на который она разбивается для расчета корреляционной функции. В нашем случае было принято  $\Delta x = 1$  пиксель. Размер одного пикселя равнялся 0,847 мкм.

При анализе профилограмм также строили графики спектральной плотности – спектрограммы. Спектральная плотность является функцией, описывающей распределение дисперсии неровностей по частотам. Она показывает, какого рода неровности преобладают в данном профиле. По сравнению с коррелограммой ее основным достоинством является наглядность [12]. Спектральная плотность  $S(\omega)$  профиля представляет собой сумму спектральных плотностей систематической  $S_\beta(\omega)$  и случайной  $S_\gamma(\omega)$  составляющих профиля поверхности. При построении спектрограмм расчет значений спектральной плотности выполняли по преобразованной формуле (2)

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

где  $K(\tau)$  – значение корреляционной функции в точке с абсциссой  $\tau$ ;  $\omega$  – частота неровностей в точке с абсциссой  $\tau$ , Гц,  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ;  $T$  – период неровностей в точке с абсциссой  $\tau$ , мкм.

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

Аппроксимация построенных коррелограмм производилась с помощью Curve Fitting Tool пакета MatLab [14] функцией, позволяющей учесть систематические неровности как с большим, так и с малым шагом и имеющей вид [15]

$$K(\tau) = c^2 Ra^2 \left[ \gamma e^{-\alpha \tau} + \beta \cos\left(\frac{2\pi}{T_\beta} \tau\right) + \nu \cos\left(\frac{2\pi}{T_\nu} \tau\right) \right], \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент частотного состава случайных неровностей;  $\beta$ ,  $\nu$  – коэффициенты высот систематических неровностей соответ-

ственно с периодами  $T_\beta$ ,  $T_\nu$ ;  $c$  – коэффициент, зависящий от формы неровностей и закона их распределения по высоте (принимался равным  $\sqrt{\pi/2}$  [15]).

Показатель  $\alpha$  определяет частотный состав случайных неровностей: чем меньше значение  $\alpha$ , тем плавнее случайные неровности и тем больше расстояние между ними [12]. Коэффициенты  $\gamma$ ,  $\beta$  и  $\nu$  характеризуют вклад, вносимый соответствующими составляющими шероховатости поверхности в  $Ra^2$ , причем  $\gamma + \beta + \nu = 1$ . В зависимости от соотношения коэффициентов можно судить о характере неровностей поверхности.

Из формулы (3) следует, что при  $\tau = 0$  корреляционная функция связана с  $Ra$  соотношением

$$K(0) = c^2 Ra^2. \quad (4)$$

На точность аппроксимации коррелограммы большое значение 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 определяли значения шагов, соответствовавшие двум наибольшим пикам. Меньший шаг характеризует высокочастотные, а больший – низкочастотные гармоники систематических неровностей. После введения в программу всех данных производился расчет параметров аппроксимации коррелограмм с доверительной вероятностью 95 %. Параметр  $Ra$  рассчитывался по (4). Результаты расчетов представлены в табл. 1. На рис. 4 в качестве примера приведены коррелограммы поверхностей и их аппроксимация для сталей 10 и 20Х13 после ЭИП в течение 10 мин.

**Обсуждение результатов исследований.** В результате математической обработки профилограмм для каждой из них были построены коррелограммы, спектрограммы, сглаженные гистограммы и графики зависимостей коэффициентов корреляционной функции от продол-

жительности ЭИП. На рис. 5 в качестве примера представлены коррелограммы и спектрограммы поверхности образцов из сталей 10 и 20Х13 после ЭИП в течение 15 мин.

Анализ полученных результатов показал, что в структуре исходной шероховатости значительное место занимают высокочастотные как случайные, так и систематические неровности с периодом до 200 мкм (рис. 6).

Таблица 1

Исходные данные, вид линии отсчета ординат профиля и значения параметров приближения

Образец	Продолжительность ЭИП, мин	$Ra_{\text{намер}}$ , мкм	$ERa$ , мкм	Тип приближения линии отсчета	Параметры приближения*	Параметры уравнения корреляционной функции					
						$\gamma$	$\beta$	$\nu$	$T_{\beta}$ , мкм	$T_{\nu}$ , мкм	$\alpha$
Сталь 10 $Ra_{\text{тех}}$ 1,3 мкм	0	1,30	0,95	L	-	0,715	0,138	0,147	499,4	266,3	0,040
	1	0,70	0,66	L	-	0,646	0,339	0,015	466,8	220,3	0,016
	2	0,49	0,38	LRL	-	0,650	0,340	0,010	609,6	260,0	0,009
	3	0,33	0,27	SPL	$1e-10$	0,743	0,214	0,043	582,6	208,2	0,013
	5	0,17	0,18	SPL	$1e-7$	0,636	0,117	0,247	462,8	219,8	0,066
	7	0,16	0,16	SPL	$5e-9$	0,568	0,351	0,081	451,0	241,0	0,034
	10	0,14	0,14	FTW	3	0,540	0,440	0,020	531,2	283,1	0,037
	15	0,13	0,12	SPL	$3e-9$	0,481	0,456	0,093	781,7	305,7	0,037
Сталь 10 $Ra_{\text{тех}}$ 0,63 мкм	0	0,63	0,59	LR	-	0,730	0,118	0,152	345,7	72,84	0,088
	1	0,31	0,29	SPL	$1e-9$	0,750	0,143	0,107	438,3	161,8	0,047
	2	0,33	0,17	FTW	1	0,827	0,123	0,050	431,7	111,0	0,019
	3	0,15	0,18	SPL	$1e-7$	0,750	0,133	0,117	307,0	158,5	0,010
	5	0,12	0,13	SPL	$5e-9$	0,492	0,226	0,282	544,3	284,9	0,043
	7	0,11	0,11	SPL	$5e-8$	0,800	0,070	0,130	408,0	268,0	0,074
	10	0,10	0,10	FTW	2	0,310	0,588	0,070	527,4	308,6	0,043
	15	0,09	0,09	FTW	2	0,621	0,289	0,091	478,0	335,0	0,088
Сталь 20Х13 $Ra_{\text{тех}}$ 1,4 мкм	0	1,40	1,25	LRL	-	0,780	0,170	0,050	193,0	143,0	0,056
	1	1,19	1,07	LRL	-	0,740	0,110	0,150	515,0	192,1	0,044
	2	0,97	0,91	LRL	-	0,690	0,150	0,160	549,3	203,0	0,020
	3	0,83	0,83	SPL	$2e-9$	0,660	0,220	0,120	599,0	159,0	0,038
	5	0,71	0,72	SPL	$3e-8$	0,540	0,120	0,340	312,0	212,0	0,040
	7	0,68	0,68	SPL	$5e-10$	0,450	0,470	0,080	590,0	315,8	0,028
	10	0,61	0,61	SPL	$6e-10$	0,490	0,220	0,290	622,0	430,8	0,027
	15	0,53	0,55	FTW	3	0,590	0,230	0,180	847,0	371,2	0,017
Сталь 20Х13 $Ra_{\text{тех}}$ 0,53 мкм	0	0,53	0,53	LRL	-	0,850	0,070	0,080	294,3	82,92	0,108
	1	0,40	0,46	SPL	$1e-8$	0,890	0,033	0,077	519,0	178,0	0,138
	2	0,36	0,38	SPL	$6e-8$	0,787	0,095	0,118	324,9	169,9	0,079
	3	0,35	0,36	LRL	-	0,731	0,138	0,131	408,4	313,1	0,039
	5	0,21	0,23	SPL	$3e-9$	0,662	0,219	0,071	333,6	248,6	0,036
	7	0,20	0,19	FTW	2	0,646	0,135	0,219	421,9	301,8	0,031
	10	0,18	0,18	SPL	$1e-7$	0,600	0,220	0,180	217,8	181,0	0,061
	15	0,13	0,13	SPL	$9e-9$	0,640	0,230	0,130	449,8	340,1	0,041

\* – для типа приближения SPL приведено значение параметра сглаживания, для FTW – количество членов в ряду.

а

б

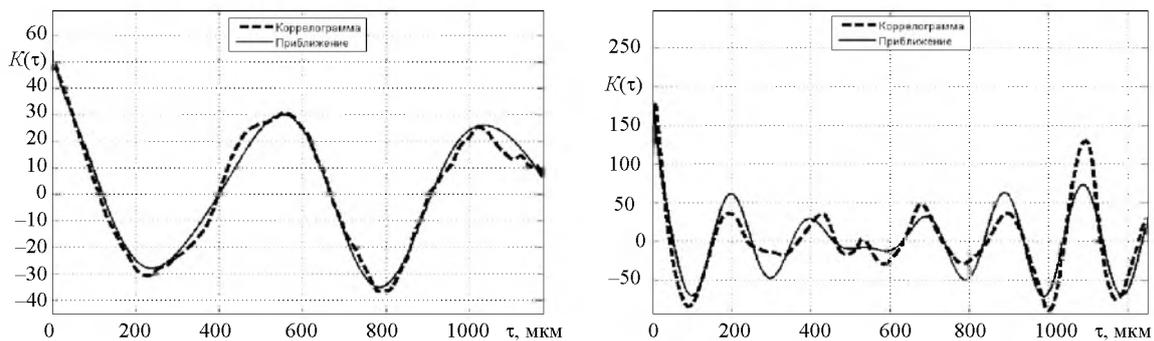


Рис. 4. Коррелограммы поверхности и их аппроксимация: а – сталь 10,  $Ra_{исх}$  0,63 мкм; б – сталь 20X13,  $Ra_{исх}$  0,53 мкм

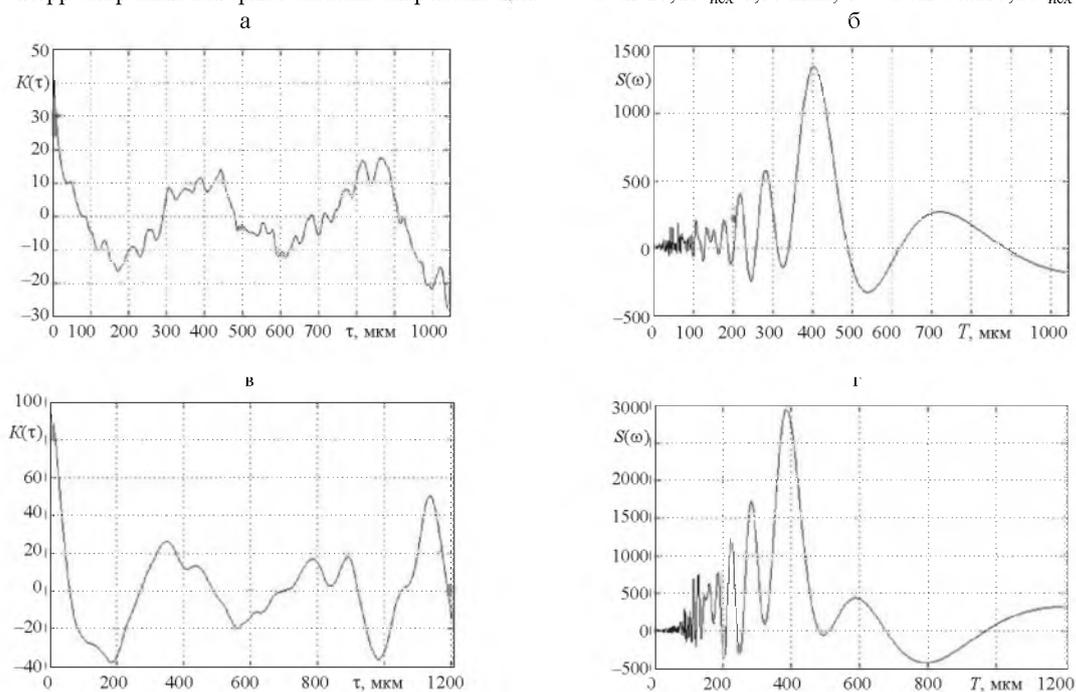
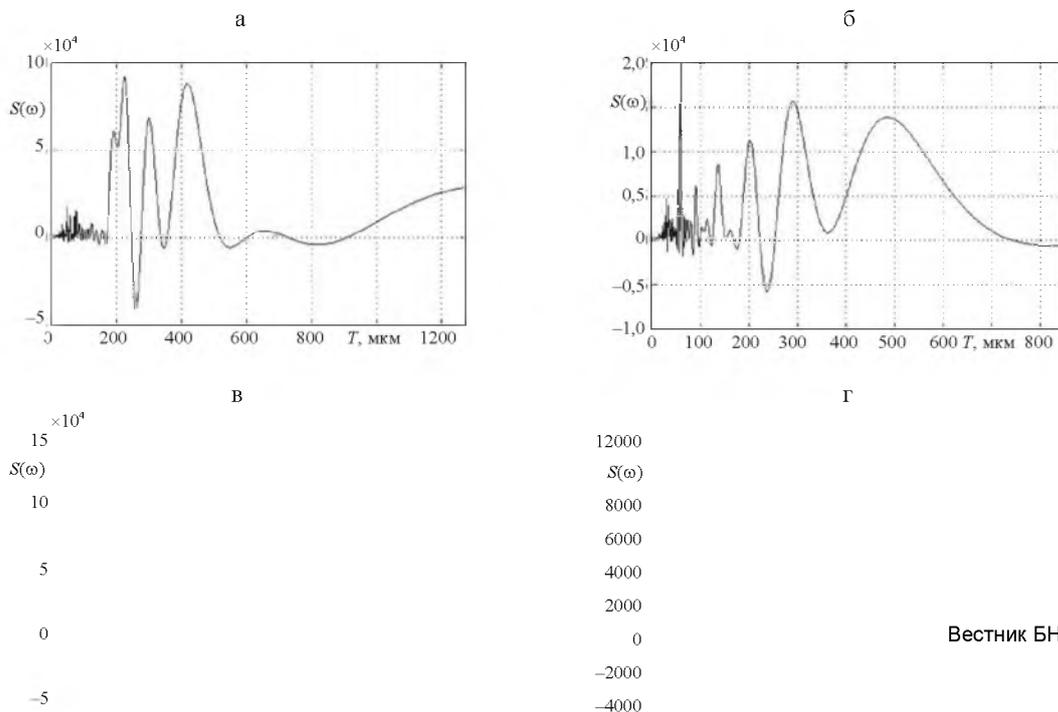


Рис. 5. Коррелограммы (а; в) и спектрограммы (б; г) поверхности образцов после ЭИП:  
а; б – сталь 10,  $Ra_{исх}$  0,63 мкм; в; г – сталь 20X13,  $Ra_{исх}$  0,53 мкм



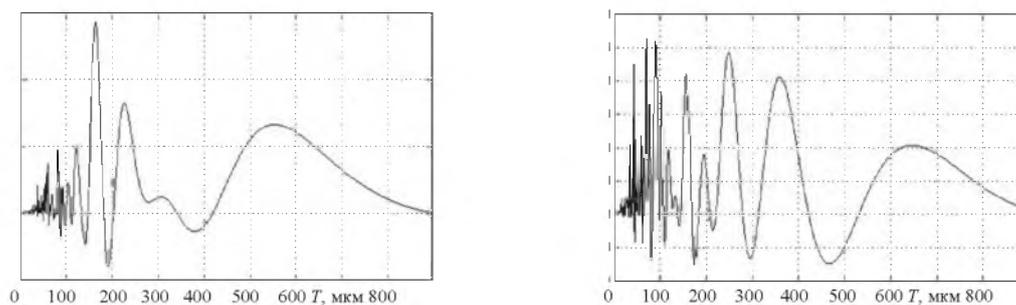


Рис. 6. Спектрограммы исходной поверхности образцов: а – сталь 10,  $Ra_{нecх}$  1,3 мкм; б – то же,  $Ra_{нecх}$  0,63 мкм; в – сталь 20X13,  $Ra_{нecх}$  1,4 мкм; г – то же,  $Ra_{нecх}$  0,53 мкм

При последовательном анализе спектрограмм видно, что амплитуды неровностей независимо от их периода убывают по мере увеличения продолжительности обработки. Рост коэффициента  $\beta$  свидетельствует о том, что во всех случаях наблюдается увеличение шагов систематических неровностей и повышение влияния низкочастотных неровностей на совокупную шероховатость поверхности. После 10 мин полирования происходит выделение одной или двух преобладающих низкочастотных гармоник с периодами от 180 до 600 мкм. Суммарный вклад этих гармоник в величину среднеквадратического отклонения профиля поверхности достигает 69 %. Неровности с мелким шагом и малой амплитудой постепенно уменьшаются и после 5–15 мин обработки практически исчезают из структуры шероховатости, что заметно при сравнении спектрограмм профиля, приведенных на рис. 5б, г и 6. Данное изменение структуры неровностей может быть объяснено равно вероятным съемом металла со всей поверхности в процессе ЭИП.

Вид сглаженных гистограмм показывает, что закон распределения, близкий к нормальному, характерен только для исходных шлифованных поверхностей. В остальных случаях наблюдается либо асимметрия кривой, либо многовершинность, что является признаками присутствия в профиле полированной поверхности систематической компоненты [12]. Данный факт объясняется тем, что исходные поверхности получены шлифованием – методом, который придает значительную случайность профилю [10], а также снижением в процессе ЭИП влияния случайной составляющей на структуру шероховатости поверхности. При увеличении продолжительности обработки до

5–10 мин происходит плавное снижение уровня случайной составляющей, характеризующееся уменьшением коэффициента случайности профиля  $\gamma$ . Профиль становится более однородным и периодичным. На промежутке от 10 до 15 мин обработки наблюдаются рост уровня случайной составляющей и значительное замедление темпа снижения шероховатости. Последний факт можно объяснить проявлением микроструктуры на поверхности образцов за счет более интенсивного разрушения металла на границах зерен. Это согласуется с результатами ранее проведенных исследований [17], в которых было установлено, что минимально достижимое значение шероховатости поверхности при ЭИП зависит от химического и фазового состава полируемого сплава, размера зерна и наличия неметаллических включений.

Анализ зависимости коэффициента  $\alpha$  от продолжительности обработки показал, что за первую минуту при ЭИП стали 10 с  $Ra_{нecх}$  0,63 и 1,3 мкм и стали 20X13 с  $Ra_{нecх}$  0,53 и 1,4 мкм его значение снизилось в среднем соответственно на 52; 60; 56 и 29 %. Увеличение времени ЭИП приводит к уменьшению достигнутого значения коэффициента  $\alpha$  на промежутках 1–3 мин для стали 10 и 1–7 мин для стали 20X13 с  $Ra_{нecх}$  0,53 мкм. Дальнейшая обработка приводит к росту коэффициента  $\alpha$ . Для стали 20X13 с  $Ra_{нecх}$  1,4 мкм снижение коэффициента  $\alpha$  происходит во всем исследованном диапазоне продолжительности обработки. Следовательно, в процессе ЭИП случайные неровности, так же как и систематические, постепенно сглаживаются, шаг между ними увеличивается. Это происходит до тех пор, пока не начинает проявляться микроструктура поверхности.

Полученные данные хорошо согласуются с результатами исследования изменения параметров шероховатости поверхности при ЭИП, представленными в [11, 18].

### ВЫВОД

Установлено, что в процессе ЭИП независимо от исходной шероховатости и вида обрабатываемого материала формирование топографии поверхности происходит за счет одновременного с равной вероятностью и равной интенсивностью сглаживания микро- и субмикронеровностей поверхности. Следовательно, учитывая то, что ПГО представляет собой динамически устойчивую систему со средней толщиной, соизмеримой с высотой микронеровностей поверхности [19], пробой ПГО происходит с равной вероятностью как на вершинах, так и во впадинах микропрофиля обрабатываемой поверхности в областях случайных неоднородностей электрического поля, обусловленных, в частности, подвижностью ПГО.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Фельдштейн, Е. Э.** Управление формированием качества поверхности деталей при механической обработке / Е. Э. Фельдштейн, И. Л. Баршай, В. К. Шелег. – Минск: БНТУ, 2006. – 227 с.
2. <http://www.finishing.narod.by>
3. **Влияние** метода полирования стали на шероховатость и эксплуатационные свойства контактных поверхностей / А. А. Хмыль [и др.] // Трение и износ. – 1996. – Т. 17, № 4. – С. 491–496.
4. **Куликов, И. С.** Электролитно-плазменная обработка материалов / И. С. Куликов, С. В. Ващенко, А. Я. Каменев. – Минск: Беларуская навука, 2010. – 232 с.
5. **Способ** электрохимического полирования изделий из хромоникелевых сталей: пат. 2118412 РФ, МПК<sup>6</sup> С 25 F 3/24 / А. С. Ставышенко, С. В. Скифский, П. Е. Наук; заявитель Тюменский гос. нефтегаз. ун-т. – № 97106310; заявл. 24.04.97; опубл. 27.08.98.
6. **Разработать** основы теории и технологии изготовления изделий медицинского назначения [текст]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. темы Ю. Г. Алексеев. – Минск, 2005. – 48 с. – № ГР 20041012.
7. **Физико-механические** свойства и электрополирующие процессы в материалах, находящихся в мощных электростатических и электромагнитных полях [текст]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. темы А. А. Кособуцкий. – Минск, 2004. – 61 с. – № ГР 20022618.
8. **Изготовить** опытно-промышленный образец исследовательской установки по электролитно-плазменной обработке материалов [текст]: отчет о НИР (заключ.) / БНТУ; рук. темы А. А. Кособуцкий. – Минск, 2004. – 25 с. – № ГР 20043544.
9. **Dagnall, H. M. A.** Exploring surface texture / M. A. H. Dagnall. – LEICESTER, ENGLAND: RANK TAYLOR HOBSON, 1980. – 170 p.
10. **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.
11. **Шелег, В. К.** Формирование микрогеометрии поверхности при электроимпульсном полировании / В. К. Шелег, Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2007. – № 8. – С. 48–52.
12. **Витенберг, Ю. Р.** Шероховатость поверхности и методы ее оценки / Ю. Р. Витенберг. – Л.: Судостроение, 1971. – 101 с.
13. **Смирнов, Н. В.** Краткий курс математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М.: Физматгиз, 1959. – 436 с.
14. **Ануфриев, И. Е.** MATLAB 7 / И. Е. Ануфриев, А. Б. Смирнов, Е. Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
15. **Витенберг, Ю. Р.** Оценка шероховатости с помощью корреляционных функций / Ю. Р. Витенберг // Вестник машиностроения. – 1969. – № 1. – С. 55–57.
16. **Расчет и построение** коррелограмм уплотняющих поверхностей деталей судовой арматуры / Г. С. Беляев [и др.] // Судостроение. – 1971. – № 6. – С. 46–49.
17. **Исследование** параметров шероховатости поверхности стальных деталей после электроимпульсного полирования и нанесения тонкопленочных покрытий / Е. Я. Головкина [и др.] // Известия вузов СССР. Сер. Машиностроение. – 1989. – № 6. – С. 134–138.
18. **Синькевич, Ю. В.** Обеспечение геометрических параметров качества поверхности электроимпульсным полированием / Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. / Донецкий нац. техн. ун-т. – Донецк, 2006. – Вып. 32. – С. 200–206.
19. **Синькевич, Ю. В.** Физико-математическая модель процесса электроимпульсного полирования / Ю. В. Синькевич, И. Н. Янковский // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. / Донецкий нац. техн. ун-т. – Донецк, 2006. – Вып. 32. – С. 206–212.

Поступила 04.05.2011