

# Прогнозирование работоспособности поверхностей трения, образованных электроискровой обработкой

С. А. Величко<sup>а</sup>, П. В. Сенин<sup>а</sup>, В. И. Иванов<sup>б</sup>, А. В. Мартынов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева» (ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н.П. Огарева»),

ул. Большевикская, д. 68, г. Саранск, 430005, Россия, e-mail: [Velichko2005@yandex.ru](mailto:Velichko2005@yandex.ru)

<sup>б</sup>Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка (ФГБНУ ГОСНИТИ), 1-й Институтский проезд, д. 1, г. Москва, 109428, Россия, e-mail: [tehnoinvest-vip@mail.ru](mailto:tehnoinvest-vip@mail.ru)

Вероятностно-статистическим методом получены данные, являющиеся исходной базой для прогнозирования и построения моделей опорных кривых шероховатых поверхностей, образованных электроискровой обработкой. Установлены связи между параметрами шероховатости и работоспособностью восстановленных пар трения.

*Ключевые слова:* критическое давление, профиль поверхности, шероховатость, электроискровая обработка, масляные карманы, вероятностно-статистический метод, закон Вейбулла, комплексный показатель шероховатости, базовая длина, площадь, объем.

УДК 621.793:631.3

## ВВЕДЕНИЕ

*Состояние вопроса.* В первом приближении несущую способность пары трения скольжения можно определить по формуле [1]:

$$q_{кр} \approx \frac{6bHBv^{\nu}}{5R_{max}^{\nu}} \left( \frac{h}{r} \right)^{\nu}, \quad (1)$$

где  $q_{кр}$  – критическое давление, при котором наиболее высокие микронеровности более твердой поверхности внедряются на глубину  $h$  мягкой поверхности, приводя к разрушению смазочную пленку;  $R_{max}$  и  $r$  – наибольшая высота и радиус кривизны неровности профиля соответственно;  $5/6 R_{max} \approx R_z$  – средняя от пяти наибольших и наименьших точек неровности профиля;  $b$  и  $\nu$  – параметры кривой опорной поверхности;  $HB$  – микротвердость более мягкой поверхности.

Средний радиус кривизны вершин неровности шероховатой поверхности (рис. 1 и 2) на уровне сечения « $h_i$ » можно определить по формулам [1, 2]:

$$r = \sum_{i=1}^n r_i = \sum_{i=1}^n \frac{h_i^2 + k_i^2}{8h_i} \quad (2)$$

или

$$r = \frac{9R_a^2 S_m^2}{128(R_p - \zeta R_a)^3}, \quad (3)$$

где  $h_i$  – расстояние от вершины неровности до основания  $k_i$  (рис. 1);  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля;  $S_m$  – средний шаг неровностей профиля по средней линии « $m-m$ »;  $R_p$  – расстояние от вершины выступа до средней линии « $m-m$ »;  $\zeta$  – коэффициент пропорциональности ( $\zeta = 0,5 \div 1,0$ ). Как следует из формул

(1)–(3), несущая способность пар трения при прочих равных условиях в основном зависит от параметров шероховатости поверхности. Кроме этого, чтобы при давлениях  $q \approx q_{кр}$  не возникало заедание, микронеровности поверхности должны обладать свойством удерживать смазку в масляных карманах (далее МК).

Смазочный материал, аккумулированный в МК, имеет некоторую несущую способность за счет гидродинамической силы и создает условие для восстановления граничной смазочной пленки в местах ее разрушения. Смазка в МК обладает наибольшей несущей способностью в том случае, если угол раскрытия впадины МК достаточно малый. Тогда масло за счет сил поверхностного натяжения выступает над поверхностью трения, тем самым воспринимая часть внешней нагрузки и обеспечивая смазку деталей. Опыт Д.Н. Гаркунова [3] показал, что при перемещении одной поверхности над углублением, наполненным смазкой до уровня даже ниже уровня другой поверхности, происходит извлечение смазочного материала до полного опорожнения резервуара.

После электроискровой обработки (далее ЭИО) на поверхности остаются скругленные, сферические выступы и впадины, равномерно расположенные по обработанной площади. Микрорельеф поверхности имеет практически одинаковые свойства по всем направлениям и не содержит острых гребешков, как после механической обработки (рис. 1).

Параметры шероховатости поверхности после ЭИО (рис. 1б) значительно отличаются от параметров шероховатости исходного профиля после

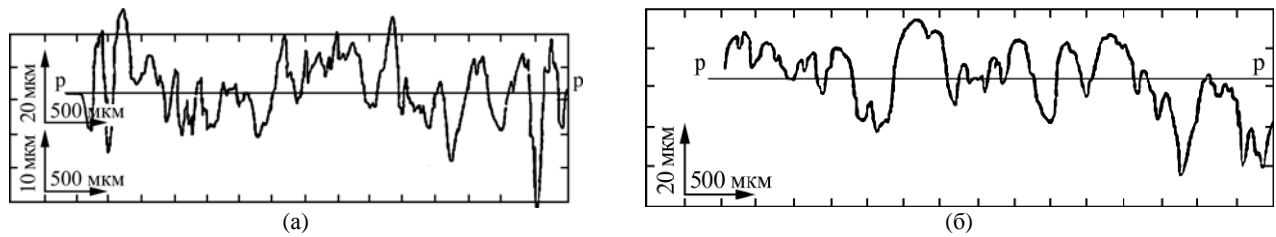


Рис. 1. Общий вид профилей поверхности: (а) после механической обработки; (б) после ЭИО.

механической обработки (рис. 1а). Для повышения несущей способности поверхности необходимо обеспечить сплошность покрытия, например, поверхностно-пластическим деформированием (ППД) или механической обработкой. Так, для деталей гидроагрегатов, восстанавливаемых методом ЭИО, применяется бесцентровое шлифование. В результате образуется новая поверхность (рис. 2) с наличием условно гладких зон и зон с МК.

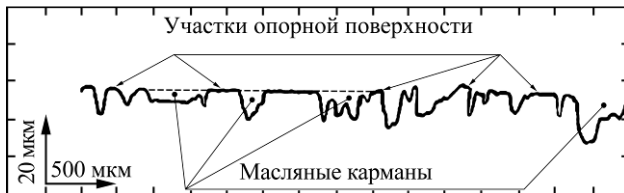


Рис. 2. Профилеграмма электроискрового покрытия после шлифования.

С ростом ширины и глубины МК увеличивается объем смазки, улучшаются диссипативные характеристики поверхности трения, но при этом уменьшается относительная опорная площадь поверхности в зоне контакта. Нахождение оптимального соотношения между площадью опорной поверхности трения, воспринимающей внешнюю нагрузку, и площадью поверхности, занятой под смазку, является базовым условием создания задиростойких пар трения с высокой несущей способностью.

В настоящее время не установлены корреляционные связи между относительной опорной площадью шероховатости, относительной площадью и объемом масла в МК, поверхностей, образованных ЭИО.

Цель работы – моделирование параметров микронеровности поверхностей, образованных ЭИО, и установление связи между параметрами шероховатости и работоспособностью восстановленной пары трения.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Статистический анализ распределения высотных, шаговых и опорных параметров микронеровностей выполнен методами случайных процессов в соответствии с ГОСТом 2789-73. Аналитическое описание шероховатости поверхности деталей проводится двумя методами: детерминистическим [1, 2, 4–6] и вероятностно-статистическим [7–10].

При детерминистическом методе исследования текстуры покрытий параметры шероховатости согласно ГОСТу 2789-73 –  $R_{\max}$ ,  $R_a$ ,  $S_m$  и  $R_z$  – вычисляются непосредственно из профилограмм (рис. 1 и 2), снятых с исходной и обработанной поверхностей. Относительная опорная длина профиля  $t_p$  определяется расчетным путем по формуле:

$$t_p = \frac{1}{L_0} \sum_{i=1}^n b_i, \quad (4)$$

где  $L_0$  – базовая длина;  $b_i$  – ширина сечения  $i$ -го выступа на уровне « $p$ »;  $n$  – число сечений.

Начальный участок опорной длины профиля в координатах  $t_p$  и  $p/R_{\max}$  аппроксимируется формулой Н.Б. Дёмкина [5]:

$$t_p = b \cdot \left( \frac{p}{R_{\max}} \right)^v, \quad (5)$$

где  $p$  – расстояние от линии выступов до текущего сечения профиля (рис. 1 и 2);  $b$ ,  $v$  – параметры, определяемые экспериментально с использованием профилограмм, снятых с шероховатой поверхности.

Следовательно, без существенной ошибки можно принять, что относительная опорная длина профиля МК  $\xi_p \approx 1 - t_p$  [4].

Как правило, участок аппроксимации функции  $t_p$  для поверхностей после механической обработки находится в пределах  $0 \leq p/R_{\max} < 0,5$ .

При моделировании шероховатости поверхности, образованной ЭИО и последующим шлифованием, расчет  $t_p$  проводится от  $p/R_{\max} = 0,05$  до  $p/R_{\max} = 0,99$ . Следовательно, без большой погрешности формулой (5) невозможно произвести аппроксимацию опорной кривой шероховатой поверхности, построенной в координатах  $t_p$ ,  $p/R_{\max}$  на всем диапазоне изменения  $p/R_{\max}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Решение возникшей задачи предложено осуществить вероятностно-статистическими методами, то есть построить опорную кривую профиля в координатах  $t_p$ ,  $p$  или  $t_p$ ,  $(R_{\max} - p) = d$  и произвести ее аппроксимацию двухпараметрическим распределением закона Вейбулла в виде:

$$t_p = F(p) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{p}{a_{t_p}} \right)^{b_p} \right], \quad 0 \leq p < \infty, \quad (6)$$

где  $a_{i_p}$  и  $b_{i_p}$  – параметры закона. При этом  $v = b_{i_p}$ ;  $a_{i_p} = \left(\frac{R_{\max}}{b^v}\right)$ .

Тогда функция  $t_p(p)$  будет определяться по следующему выражению:

$$t_p = F(p) = 1 - \exp\left[-b\left(\frac{p}{R_{\max}}\right)^v\right], \quad 0 \leq p < \infty. \quad (7)$$

В данной работе моделирование относительной опорной кривой шероховатости осуществлялось с использованием формулы (7).

В целях аналитического определения параметров  $v$  и  $b$  обобщены результаты исследований 33 типовых профилограмм, снятых профилографом-профилометром “Form Talysurf” английской фирмы «Тейлор Хобсон» с профилей, образованных ЭИО с толщиной покрытия от 20 до 110 мкм и  $R_{\max}$  в интервале от 4,5 до 100 мкм и более. Затем были построены вариационные ряды  $\{v_i\}$  и  $\{b_i\}$ , где  $i = \overline{1, \dots, N}$ , обработка которых позволила определить основные статистические характеристики параметров  $v$  и  $b$  и свести их в табл. 1.

Здесь  $N$ ,  $\bar{X}$ ,  $\sigma(X)$ ,  $v(X)$ ,  $X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  – число наблюдений (профилограмм), средние значения, среднеквадратические отклонения, коэффициент вариации, нижние и верхние экспериментальные оценки толерантных границ соответственно.

При известном значении коэффициента вариации параметры закона Вейбулла равны для  $v$  [11]:  $b(X)^* = 3,4$ ,  $K_b = 0,9$ ,  $C_b = 0,29$ ; для  $b$ :  $b(X)^* = 3,1$ ,  $K_b = 0,89$ ,  $C_b = 0,32$ ; для  $R_{\max}$ :  $b(X)^* = 2,5$ ,  $K_b = 0,89$ ,  $C_b = 0,38$ .

Для полной выборки определение значения  $a(X)^*$  производится по выражению:

$$a(X)^* = \frac{\bar{X}}{K_b}. \quad (8)$$

Подставляя данные табл. 1 в выражение (8), получаем для  $v$ :  $a(X)^* = 2,24$ ; для  $b$ :  $a(X)^* = 4,47$ ; для  $R_{\max}$ :  $a(X)^* = 69,6$ .

На основании закона распределения параметров  $v$  и  $b$  построены двусторонние доверительные границы для средних значений данных параметров при доверительной вероятности  $\alpha$  от 0,60 до 0,95 с использованием следующих выражений [11]:

$$\bar{X}_H = (\bar{X} - C)^{b(X)^*} \sqrt[r_1]{r_1} + C, \quad (9)$$

$$\bar{X}_B = (\bar{X} - C)^{b(X)^*} \sqrt[r_3]{r_3} + C, \quad (10)$$

где  $\bar{X}_H$  и  $\bar{X}_B$  – нижняя и верхняя границы рассеивания среднего значения показателя надежности при заданной доверительной вероятности  $\beta$ ;  $C$  – смещение распределения ( $C = 0$ );  $r_1$  и  $r_2$  – вспомогательные коэффициенты.

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Полученные данные являются исходной базой для прогнозирования и построения моделей опорных кривых шероховатых поверхностей, образованных ЭИО. Для поверхностей с другими толщинами покрытий и высотными параметрами шероховатости, существенно отличающимися от рассмотренных, значения параметров  $v$ ,  $b$  дополнительно уточняются.

По  $R_{\max}$ ,  $r$ ,  $v$  и  $b$  может быть определен комплексный показатель шероховатости:

$$\Delta = \frac{R_{\max}}{rb^v}. \quad (11)$$

Комплексный параметр шероховатости  $\Delta$  является одним из важных оценочных показателей качества поверхностей. Поэтому его значение должно быть записано в требованиях ремонтного чертежа детали.

При моделировании методами случайных процессов нерегулярной шероховатости вводятся два дополнительных параметра шероховатости:  $n(0)$  – число пересечений профилем его средней линии « $m$ – $m$ »;  $z$  – число максимумов вершин неровностей профиля.

Существуют разные подходы [1, 2, 4–10] к установлению корреляционной связи между  $R_a$ ,  $S_m$  и  $n(0)$ , что иногда приводит к противоречивым результатам. Особенно это относится к покрытиям, образованным ЭИО. Поэтому практическую и теоретическую ценность имеет разработка методики, позволяющей упростить анализ микрогеометрии нерегулярных шероховатых поверхностей и повысить точность оценки.

Обобщение экспериментальных данных, приведенных в работах [1, 2, 4–10], и результатов исследования авторов данной статьи позволило построить следующие эмпирические формулы связи между средними значениями  $S_m$ ,  $n(0)$  и  $R_a$ :

$$10^{-3} \cdot \bar{S}_m = \frac{2}{n(0)} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\bar{R}_a}{24}\right)^{0,85}\right], \quad \text{при } n(0) > 2 \text{ мм}^{-1}, \quad (12)$$

откуда

$$\bar{R}_a = 24 \left[ -\ln\left(1 - \frac{2}{n(0)}\right) \right]^{1,1765}, \quad \text{при } n(0) > 2 \text{ мм}^{-1} \quad (13)$$

где  $\bar{S}_m$  и  $\bar{R}_a$  – средние значения  $R_a$ ,  $S_m$  в мкм соответственно, а  $\bar{n}(0)$  – среднее значение  $n(0)$  в  $\text{мм}^{-1}$ .

Верхняя и нижняя границы  $R_a$  получены по приближенным расчетным формулам:

$$R_a^H = 14,5 \left[ -\ln\left(1 - \frac{2}{n(0)}\right) \right]^{1,205}, \quad (14)$$

**Таблица 1.** Основные статистические характеристики параметров опорной кривой  $\nu$  и  $b$ 

Параметры	$N$	$\bar{X}$	$\sigma(X)$	$\nu(X)$	$X_{\max}$	$X_{\min}$	$a(X)^*$	$b(X)^*$
1	2	3	4	7	5	6	9	10
$\nu = b_{t_p}$	33	2,02	0,66	0,33	2,71	1,28	2,24	3,4
$b = \sqrt[\nu]{\frac{R_{\max}}{a_{t_p}}}$	33	3,98	1,38	0,35	6,37	2,31	4,47	3,1
$R_{\max}$	33	62	26,8	0,43	115	4,5	69,6	2,5

\* Параметры масштаба и формы распределения случайных величин  $\nu$ ,  $b$ .

**Таблица 2.** Доверительные интервалы параметров  $\nu$  и  $b$ 

Параметры	$N$	$\bar{X}$	$\sigma(X)$	Доверительные интервалы $\bar{X}$ при доверительной вероятности $\beta = 1 - \alpha$							
				0,60		0,80		0,90		0,95	
				$\bar{X}_H$	$\bar{X}_B$	$\bar{X}_H$	$\bar{X}_B$	$\bar{X}_H$	$\bar{X}_B$	$\bar{X}_H$	$\bar{X}_B$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\nu = b_{t_p}$	33	2,02	0,66	1,94	2,11	1,89	2,17	1,86	2,22	1,85	2,26
$b = \sqrt[\nu]{\frac{R_{\max}}{a_{t_p}}}$	33	3,98	1,38	3,80	4,19	3,70	4,31	3,64	4,42	3,62	4,51
$R_{\max}$	33	62	26,8	58,6	66,2	56,7	68,6	55,5	70,7	54,3	72,5

$$R_a^B = 34 \left[ -\ln \left( 1 - \frac{2}{n(0)} \right) \right]^{1,020} \quad (15)$$

В работе [7] установлено, что отношение

$$\frac{R_{\max}}{R_a} = 2 \left( \pi \cdot \ln \frac{n(0)}{2} \right)^{1/2} \cdot \left( 1 + \frac{0,577}{2 \ln \frac{n(0)}{2}} \right) \quad (16)$$

Как уже было сказано, параметры микрорельефа поверхности, образованные ЭИО, практически одинаковы по всем направлениям и не имеют острых гребешков, как после механической обработки.

В связи с изотропностью поверхности, образованной ЭИО, относительная опорная площадь поверхности:

$$T_p = t_{p_{\text{поп}}} \cdot t_{p_{\text{пр}}}, \quad (17)$$

где  $t_{p_{\text{поп}}}$  и  $t_{p_{\text{пр}}}$  – относительные опорные длины профиля поверхности в поперечном и продольном направлениях соответственно.

Следовательно, с учетом формулы (7) получаем прямую функцию:

$$T_p(p) \leq (t_p)^2 = \left\{ 1 - \exp \left[ -b \cdot \left( \frac{p}{R_{\max}^{ucx}} \right)^\nu \right] \right\}^2 \quad (18)$$

и обратную

$$p(T_p) = R_{\max}^{ucx} \left[ -\frac{1}{b} \ln \left( 1 - T_p^{1/2} \right) \right]^{1/\nu}, \quad (19)$$

которые полезны при решении прямой и обратной задач обеспечения несущей способности

пары трения, где  $b = \left( \frac{R_{\max}^{ucx}}{a} \right)^\nu$ ;  $R_{\max}^{ucx}$  – приведенная

наибольшая высота неровностей профилей в продольном и поперечном направлениях.

Профилографирование поверхности (рис. 2), образованной ЭИО, показывает, что ее текстура близка к нерегулярной шероховатости [4], масляные карманы которой представляют собой замкнутые резервуары. Как известно, такая шероховатость лучше удерживает смазку на поверхностях пары трения как при скольжении (качении, качении со скольжением), так и в состояниях покоя по сравнению с профилем с регулярной шероховатостью, так как последний создает сквозные карманы для смазки.

В соответствии с [4, 5] за показатель работоспособности шероховатой поверхности принят параметр условной глубины МК  $\Omega_p(p)$ , определяемый как отношение объема масла в МК в продольном или поперечном направлениях на уровне сечения « $p = p/R_{\max}$ » (рис. 2) к  $1 \text{ см}^2$  площади впадин МК, то есть

$$\Omega_p(p) = \frac{M_0 \bar{S}_{\text{МК}} \bar{R}_{\text{МК}}}{S_{\text{ВП}}} = \frac{V_{\text{МК}}}{S_{\text{ВП}}} \text{ мм}, \quad (20)$$

где  $M_0$  – коэффициент формы МК;  $\bar{S}_{\text{МК}}$  – средняя площадь горловины МК;  $\bar{R}_{\text{МК}}$  – средняя приведенная высота МК;  $S_{\text{ВП}}$  – площадь одного квадратного сантиметра впадин МК в продольном сечении;  $V_{\text{МК}}$  – объем масла в МК.

Если допустить, что масляные карманы в продольном сечении имеют в вероятностном

плане форму пирамид или конусов, то суммарная площадь их оснований составит:

$$S_{\text{ВП}} = \frac{1}{2} L_p \xi_p \bar{R}_{\text{МК}} = S_{\text{Б,ВП}} L_p / L_y, \quad (21)$$

где  $L_p$  – условная длина профиля шероховатости в продольном направлении, в пределах которой площадь впадин составляет 1 см<sup>2</sup>;  $S_{\text{Б,ВП}}$  – площадь впадин неровности в пределах базовой длины  $L_p$ .

Следовательно,  $L_y = 2/\xi_p R_{\text{МК}}$  в см.

В пределах базовой площади средняя площадь масляных карманов  $\bar{S}_{\text{МК}} = L_{\text{Б,ПР}} \cdot L_{\text{Б,ПОП}} \cdot \xi_{0\text{ПР}} \cdot \xi_{0\text{ПОП}}$ , а средняя высота  $\bar{R}_{\text{МК}} = (\bar{R}_{\text{МК,ПР}} \cdot \bar{R}_{\text{МК,ПОП}})^{0,5}$ , где  $\bar{R}_{\text{МК,ПР}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{МК,ПР}i}$ ;  $\bar{R}_{\text{МК,ПОП}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{МК,ПОП}i}$ ;  $\bar{R}_{\text{МК,ПР}i}$  и  $\bar{R}_{\text{МК,ПОП}i}$  – высоты МК, измеренные при фиксированном  $p/R_{\text{max}}^{\text{uex}}$  по продольным и поперечным профилограммам;  $n$  – число измерений высот МК.

Тогда объем МК в пределах условной длины  $L_y$  и  $L_{\text{Б,ПР}}/N$ :

$$\begin{aligned} V_{\text{МК}}(y) &= \frac{\bar{R}_{\text{МК}}}{3N} \cdot L_y \cdot L_{\text{Б,ПОП}} \cdot \xi_p^2 = \\ &= \frac{\bar{R}_{\text{МК}}}{3N} \cdot L_y \cdot L_{\text{Б,ПОП}} \cdot (1-t_p)^2, \end{aligned} \quad (22)$$

где  $N$  – число МК в поперечной плоскости.

В пределах базовой площади  $(L_{\text{Б,ПОП}} \cdot L_{\text{Б,ПР}}) \xi_p^2 V_{\text{МК}}$ :

$$\begin{aligned} V_{\text{МК}}(y) &= \frac{\bar{R}_{\text{МК}}}{3} \cdot L_{\text{Б,ПР}} \cdot L_{\text{Б,ПОП}} \cdot \xi_p^2 = \\ &= \frac{\bar{R}_{\text{МК}}}{3} \cdot L_{\text{Б,ПР}} \cdot L_{\text{Б,ПОП}} \cdot (1-t_p)^2. \end{aligned} \quad (22a)$$

Подставив формулы (5), (21), (22) или (22a) в формулу (20), получим:

$$\Omega_p(y) = \frac{2L_{\text{Б,ПР}}}{3N} \cdot \frac{\bar{R}_{\text{МК}}}{\bar{R}_{\text{МК,ПОП}}} \left\{ \exp \left[ -b \left( \frac{p}{R_{\text{max}}^{\text{uex}}} \right) \right]^v \right\} \quad (23)$$

или

$$\Omega_p(y) = \frac{2L_{\text{Б,ПОП}} L_{\text{Б,ПР}}}{3L_y} \cdot \frac{\bar{R}_{\text{МК}}}{\bar{R}_{\text{МК,ПОП}}} \left\{ \exp \left[ -b \left( \frac{p}{R_{\text{max}}^{\text{uex}}} \right) \right]^v \right\}. \quad (24)$$

Из формулы (24) следует, что значение показателя  $\Omega_p(y)$  прямо пропорционально приведенному объему МК базовой площади и обратно пропорционально длине  $L_y$  шероховатой поверхности.

Очевидно, что при прочих равных условиях, чем больше  $p/R_{\text{max}}$ , тем меньше  $\Omega_p(y)$  и, следовательно, тем меньший объем масла удерживается во впадинах шероховатой поверхности.

Опыт эксплуатации различных пар трения показывает, что для работы без заедания относительная опорная длина профиля шероховатой поверхности должна составлять 50–80%; следовательно, относительная опорная длина профиля

МК должна быть в пределах 20–50% [4, 5]. Так, например, для пары трения «кольцо–гильза цилиндров» с параметром шероховатости внутренней опорной поверхности гильзы цилиндров в зоне работы поршневых колец  $R_a \leq 0,32$  мкм и с глубиной регулярных МК 20–30 мкм (ГОСТ 655-75) условная глубина МК на базе измерения  $L_B = 0,8$  мм (поперек обработки) должна отвечать требованию –  $\Omega_p \geq 2 \cdot 10^{-4}$  мм. Тогда вероятность появления заедания и задира в парах трения «кольцо–гильза» и «кольцо–поршень» будет мала.

Для других поверхностей, особенно образованных ЭИО, нормативное значение параметра  $\Omega_{p,n}$  предстоит определить.

При решении практических задач, связанных с ЭИО, применительно к которой  $\xi_{\text{ПР}} = \xi_{\text{ПОП}} = \xi$ ,  $\bar{R}_{\text{МК,ПР}} = \bar{R}_{\text{МК,ПОП}} = \bar{R}_{\text{МК}}$ , если неизвестно значение  $\Omega_{p,n}$ , то, указывая ряд значений  $p/R_{\text{max}}^{\text{uex}}$ , можно определить  $\bar{R}_{\text{МК}}(y_i)$ ;  $t_p$  и  $T_p(y_i)$ . В зоне, где  $T_p$  обработанной больше  $T_p$  исходной поверхности, находится оптимальное значение  $\Omega_p(y_i)$ . При этом параметры  $b$  и  $v$  либо берут по данным обобщений (табл. 1), либо оценивают по конкретным профилограммам.

Итак, из вышеизложенного следует, что к показателям работоспособности покрытий, образованных ЭИО, относятся: 1) критическое давление  $q_{\text{кр}}$ , при котором наиболее высокие микронеровности более твердой поверхности внедряются на глубину  $h$  мягкой поверхности, приводя к разрушению смазочную пленку; 2) комплексный параметр шероховатости  $\Delta$ ; 3) относительная опорная длина профиля или площади шероховатости  $t_p(T_p)$  и относительная опорная длина (площадь) МК  $\xi_p$  шероховатой поверхности; 4) условная глубина МК в пределах базовой длины профиля шероховатости  $\Omega_p(p)$  на уровне  $p/R_{\text{max}}^{\text{uex}}$ .

Расчет по формуле (6)  $t_p$  для разных уровней « $p$ » показал, что  $t_p(p = 12 \text{ мкм}) = 0,13$ ;  $t_p(p = 20 \text{ мкм}) = 0,32$ ;  $t_p(p = 36 \text{ мкм}) = 0,73$ ;  $t_p(p = 50 \text{ мкм}) = 0,92$ ;  $t_p(p = 67 \text{ мкм}) = 0,99$ .

*Пример.* Из профилограммы на рис. 1а следует, что в пределах ее базовой длины  $L_B = 8$  мм,  $R_{\text{max}}^{\text{uex}} = 116$  мкм, а число  $n(0) = 38$  (отсчет ведется от линии выступов).

Так как наиболее просто параметры  $v$  и  $b$  определяются по известной методике [6, 12] с использованием профилографа–профилометра «Form Talysurf» английской фирмы «Тейлор Хобсон», то вычислено, что  $v = 1,9$ ;  $b = 4,3$ .

Для расчета числа пересечений  $n(0)$  кривой профиля средней линии « $m-m$ » (рис. 1) установлено среднее значение  $n(0) = 29$  (табл. 3).

**Таблица 3.** Сводная таблица результатов обработки профилограмм (рис. 1а)

$n(0) \cdot L_s$ мм <sup>-1</sup>	$S_m^p$ , мкм	$z$ , мм <sup>-1</sup>	$\frac{z}{n(0)}$	$\bar{R}_a$ , мкм	$R_a^H$ мкм	$R_a^B$ , мкм	$\frac{R_{\max}}{R_a}$	$\bar{R}_{\max}$ мкм	$R_{\max}^H$ , мкм	$R_{\max}^B$ мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
28	571	38	1,36	19,8	11,9	28,7	4,02	79,6	47,8	116

**Таблица 4.** Связь между параметрами  $n(0)$  и  $R_{\max}/R_a$ 

$n(0)$ , мм <sup>-1</sup>	2,5	5	10	50	75	100	150	200
Вид обработки	ЭИО		Плоское шлифование		Круглое шлифование		Доводка	
Класс шероховатости	1 – 6		5 – 8		9 – 10		10	
$R_{\max}/R_a$	3,8	4,4	5,3	6,9	7,3	7,5	7,8	8,1

**Таблица 5.** Сводная таблица результатов расчета статистических характеристик маслосъемности и несущей способности поверхности трения при последовательном шлифовании на величину « $p$ » (рис. 2)

№ п/п	$(p / R_{\max}^{ucx}) \cdot 100\%$	35	40	45	50	60	70
		$p_i$ , мкм	41	46	52	62	72
1	$N_i$	21	18	16	12	6	3
2	$R_{MKi}^{\min}$	–	1	2	6	2	8
3	$R_{MKi}^{\max}$	75	72	62	53	42	34
4	$\bar{R}_{MKi}$	29	26	19	15	13	16
5	$v(R_{MK})$	0,6	0,63	0,79	0,89	1,2	1,0
6	$t_{p_i}$	0,35	0,53	0,63	0,82	0,86	0,94
7	$T_{p_i}$	0,12	0,28	0,40	0,67	0,74	0,88
8	$\xi^*$	0,65	0,47	0,27	0,18	0,14	0,06
9	$\Omega_p$ , мм	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$
10	$r$ , мкм	280	340	390	470	510	610
11	$h/r^{***}$	~ 0,1	~ 0,1	~ 0,1	~ 0,1	~ 0,1	~ 0,1
12	$\Delta$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-3}$	$\cdot 10^{-4}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$
13	$Q_{kp}$ , МПа	720	1042	1350	1926	2250	3162

\*\*\*Расчет проведен по методике [1].

По профилограмме на рис. 1б определено, что ее средняя линия « $m$ – $m$ » находится на уровне  $p_{m-m} \approx 28$  мкм.

При известном  $p_{m-m}$  шаг неровностей  $S_m$  определялся непосредственно по профилограмме. Статистическая оценка среднего значения  $S_m$  по 15 профилограммам, снятым с одной поверхности (рис. 1,а), показала, что  $\bar{S}_m = 545$  мкм;  $v(S_m) = 0,53$ .

В табл. 3 указаны сводные результаты расчетов.

В работе [7] на основе многочисленных экспериментов установлено, что  $z \approx 1,32 n(0)$ . Экспериментальные данные по  $z/n(0)$ , приведенные в табл. 3, не противоречат этой зависимости.

Моделирование профиля нерегулярной шероховатости методами случайных процессов показывает, согласно формуле (13), что при малых значениях параметра  $n(0)$  (табл. 3) ( $R_{\max}/R_a$ )  $\leq 4$ , а при больших  $n(0)$  этот параметр достигает 8 и более единиц (табл. 4).

Из табл. 4 следует, что широко используемая связь между  $R_{\max}$  и  $R_a$ :  $R_{\max} \approx 6 R_a$  [1, 2, 4, 6] дает весьма заниженные величины параметра  $R_a$  для поверхностей, образованных методом ЭИО.

Обработка профилограммы, снятой поперек механической обработки (рис. 1а,  $L_p = 0,8$  мм), показала, что  $R_{\max} = 2,4$  мкм,  $R_a = 0,4$  мкм (в продольном направлении  $R_a = 0,45$  мкм),  $r = 20$  мкм, согласно расчету по формуле (2);  $b = 1,3$ ,  $v = 1,9$ ,  $\Delta = 9,6 \cdot 10^{-2}$  (на уровне  $t_{p=53}$ ,  $\Delta = 3,6 \cdot 10^{-2}$ ),  $S_m = 32$  мкм,  $N = 200$ .

Следовательно, при  $\xi_p = 20$ ,  $t_{p=80} = 0,85$  получаем, что  $\Omega_p = 80$  ( $p = 1,92$  мкм) =  $3,95 \cdot 10^{-4}$  мм, согласно расчету по формуле (24).

Расчет критического давления по формуле (1) показал, что  $q_{kp} = 590$  МПа ( $h/r \approx 0,05$  [1],  $HV \approx 2000$  МПа – твердость контртела – чугуна СЧ21).

Определенные по формулам (1), (2), (6), (11), (13), (17), (20) значения  $q_{kp}$ ,  $r$ ,  $t_p$ ,  $\Delta$ ,  $R_a$ ,  $T_p$  и  $\Omega_p(p)$ ,

а также значения  $n(0)$ ,  $\bar{R}_{МК}$ ,  $\nu(R_{МК})$ ,  $R_{МК}^{\max}$  и  $R_{МК}^{\min}$ , вычисленные непосредственно по профилограммам (рис. 1б и рис. 2 – база в поперечном и продольном направлениях 8,0 мм,  $b = 4,13$ ,  $\nu = 1,9$  и  $N = 12$ ), для фиксированных значений  $(p/R_{\max}^{сч}) = 0,35; 0,40; 0,45; 0,55; 0,60; 0,70; 0,80$  приведены в табл. 5.

Из табл. 5 следует, что длина профиля МК обработанной поверхности превосходит МК исходной (на уровне  $\xi_{p=40}$ ) в  $1,8/0,395 = 5,3$  раза, а напряженно работающей пары трения «кольцо–гильза» в 9 раз. Комплексный параметр шероховатости  $\Delta$  восстановленной поверхности в  $3,6 \cdot 10^{-2}/1,5 \cdot 10^{-2} = 2,4$  раза меньше исходного, а несущая способность в 1,76 раза выше.

Эффективность ЭИО как способа восстановления изношенных деталей и упрочнения режущих инструментов, штампов экспериментально проверена и подтверждена на парах трения: «золотник – отверстие корпуса гидрораспределителя»; «поршневое кольцо–гильза цилиндров»; «поршень–гильза цилиндров»; «шейка вала–восстановленная бронзовая втулка»; «поршневой палец–втулка верхней головки шатуна»; «золотник–гильза ГУР» и на восстановленных вершинах зуба шестерен гидронасосов, а также упрочненных деталей разделительных штампов, цанг, метчиков, ножей, сверл, резцов и других инструментов [13].

## ВЫВОДЫ

1. Профилограммы, снятые с поверхностей, образованных ЭИО и в последующем подвергнутые шлифовке, не отражают истинной шероховатости опорной поверхности. Параметры истинной шероховатости опорной поверхности можно определить, только обрабатывая участки профилограммы между МК.

2. Как правило, средняя высота микронеровностей шлифованных поверхностей приблизительно равна средней высоте неровностей обработанных поверхностей (см. табл. 3 и 4). С ростом толщины удаляемого слоя при шлифовке поверхностей, образованных ЭИО, средняя высота и площадь МК уменьшаются.

3. Использование методов детерминистического и вероятностно-статистического моделирования шероховатости поверхностей, образованных ЭИО, позволяет более точно описать шероховатости опорных поверхностей и установить интервалы изменения параметров  $b$  и  $\nu$  относительно опорной длины профиля, а также прогнозировать предельную несущую способность пары трения.

4. При разработке ремонтных и рабочих чертежей деталей регламентации подлежат следующие

параметры шероховатости:  $R_a$ ,  $\Delta = R_{\max}/rb^{1/\nu}$ ,  $t_{p=30;40;50;60;70}$ , и  $\Omega(y)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. *Основы расчетов на трение и износ*. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
2. Рыжов О.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. *Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин*. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
3. Гаркунов Д.Н. *Триботехника: учебник для студентов вузов*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
4. Бурумкулов Ф.Х., Лельчук Л.М., Пушкин И.А., Фролов С.Н. *Технология машиностроения*, 2001, (4), 29–34.
5. Демкин Н.Б. *Контактирование шероховатых поверхностей*. М.: Наука, 1970. 227 с.
6. Иванов В.И. ЭОМ. 1998, (3–4), 43–51.
7. Рудзит Я.А. *Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей*. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.
8. Найак П.Р. Применение модели случайного поля для исследования шероховатых поверхностей. *Проблемы трения и смазки*. М.: Мир, 1971. Вып. 3. С. 85–94.
9. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. *Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход)*. М.: Наука, 1975. 343 с.
10. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. *Характеристики микрогеометрии, определяющие контактное взаимодействие шероховатых поверхностей (методика определения)*. М.: Наука, 1973. 20 с.
11. Артемьев Ю.Н. *Качество ремонта и надежность машин в сельском хозяйстве*. М.: Колос, 1981. 239 с.
12. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. *Модели отказов*. М.: Советское радио, 1966. 234 с.
13. Burumkulov F.Kh., Senin P.V., Velichko S.A., Ivanov V.I., et al. *Surf Eng Appl Electrochem*. 2009, **45**(6), 455–460.

Поступила 24.09.14

После доработки 18.11.14

## Summary

Probabilistic-statistical method was used to obtain the data that are the starting point for forecasting and building models of the reference curves rough surfaces formed by the electric discharge machining. The relationship between roughness parameters and performance of remanufactured friction pairs has been established.

*Keywords: critical pressure, surface profile, roughness, electric discharge machining, oil pockets, probabilistic-statistical method, the Weibull law, complex index of roughness, base length, area, volume.*