

Ю.И. Мулин, А.Д. Верхотуров, В.Д. Власенко\*

## ФОРМИРОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ СО СПЕЦИАЛЬНОЙ МИКРОГЕОМЕТРИЕЙ ПРИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ ЛЕГИРОВАНИИ

*Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН,  
ул. Тихоокеанская, 153, г. Хабаровск, 680042, Россия  
\*Вычислительный центр ДВО РАН,  
ул. Ким-Ю-Чена, д. 65, г. Хабаровск, 680000, Россия*

### 1. Введение

Электроискровое легирование (ЭИЛ) – одно из развивающихся направлений по созданию поверхностных слоев с высокими триботехническими характеристиками. Его применение способствует увеличению ресурса работы, надежности и эффективности оборудования. Такие технологии позволяют реализовать многие положительные свойства композиционных материалов [1].

Ранее определено влияние структуры покрытия, адгезионной и когезионной прочности на ее износостойкость, установлена корреляционная связь между толщиной сплошного покрытия и величиной возникающих в нем напряжений [2]. Внутренние напряжения уменьшают прочность сцепления покрытия с подложкой; для относительно твердых покрытий при уменьшении степени их сцепления с основой увеличиваются значения отрывающих нормальных напряжений, что приводит к отслаиванию покрытий [3]. В условиях критических деформаций конструкционного материала со сплошным покрытием возможно образование трещин на поверхности и концентрация касательных напряжений на краях трещины, что даже при высокой адгезионной прочности между покрытием и подложкой снижает надежность триботехнической системы вследствие образования трещин в основном материале. В соответствии с этим прочностные возможности адгезионного контакта по передаче усилий от основы к поверхности при большой площади образуемого покрытия не используются [4].

Фактические направления пластической деформации кристаллической решетки поверхностного слоя показывают полосы локализованной деформации, которые располагаются под углом к направлению растягивающих усилий [5]. Учитывая влияние напряженно-деформированного состояния на границе раздела покрытие – основа, можно предполагать, что образование несплошных покрытий определенной микрогеометрии будет способствовать повышению износостойкости поверхностного слоя [6].

Цель данной работы – повышение износостойкости поверхностей за счет формирования несплошных покрытий определенной микрогеометрии.

### 2. Материалы, оборудование и методика проведения эксперимента

Модель напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя представлена в виде системы покрытие – основа при одноосном растяжении (рис.1). Основа изготовлена в виде пластины толщиной  $2H$ . Для обеспечения симметрии воздействия когезионных напряжений на пластине образуют покрытия с двух сторон одинаковой толщины  $h$ , длины  $2l$ , ширины  $b$ . Разрушение адгезионного контакта при значительных растягивающих напряжениях может происходить в образующемся промежуточном слое на границе с разделением покрытия на фрагменты эквидистантно полосам линий скольжения [5].

Пластины и образцы для испытания на растяжение и износостойкость изготовлены из стали 45 (ГОСТ 1050-74). Для формирования покрытий толщиной  $h = 0,06$  мм использовали электроды из твердых сплавов ВК6М и Т5К10 и установки ЭИЛ моделей ИМ-05, ИМ-101. Исследования на растя-

жение выполнены на разрывной машине УМ-5. Для сравнительных испытаний на износостойкость в соответствии с ГОСТ 23.222-84 применена машина трения МТ-22П под нагрузкой 100 Н по схеме вал–колодка при скорости скольжения по образцу 0,25 м/с в условиях трения без смазки. Вал изготовлен из стали 40Х (HRC 62-64). Базой испытаний принят путь трения равный 20 км. Все испытания проводились по три раза. Величины износа колодки и вала определяли гравиметрическим методом, коэффициенты трения – с помощью специального устройства, температуру в поверхностном слое на расстоянии 3 мм от поверхности контакта – с помощью хромель-копелевой термопары и лагометра модели Ш-4501.

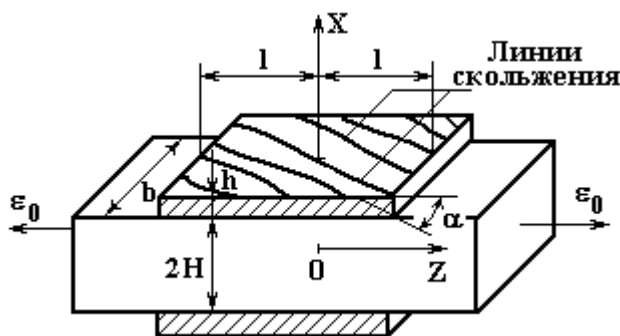


Рис. 1. Модель для расчета напряжений в системе покрытие–основа:  $h$  – толщина покрытия;  $2H$  – толщина основы;  $2l$  – длина покрытия;  $b$  – ширина покрытия;  $\epsilon_0$  – деформация в направлении оси  $z$

### 3. Расчет напряженного состояния на границе системы покрытие – основа

При образовании покрытий методом ЭИЛ в поверхностном слое возникают внутренние растягивающие напряжения, а в верхнем слое основы у границы соединения – сжимающие [7].

Из условия равновесия элементов при одноосном растяжении системы получаем касательные напряжения с учетом угла  $\alpha$  [8]:

$$\text{для покрытия} \quad \tau_n = -h \frac{d\sigma_n}{dz} \cdot \cos \alpha, \quad (1)$$

$$\text{для основы} \quad \tau_0 = -H \frac{d\sigma_0}{dz}, \quad (2)$$

где  $\sigma_n$ ,  $\sigma_0$  – нормальные напряжения в покрытии и основе,  $h$  – толщина покрытия,  $H$  – половина толщины основы.

Для системы покрытие – основа вводятся следующие условия:

$$\tau_n = -\frac{1}{b} \cdot \frac{dP_n}{dz}, \quad \tau_0 = \frac{1}{2b} \cdot \frac{dP_0}{dz}, \quad (3)$$

где  $P_n$  – сжимающее усилие в одном слое покрытия;  $P_0$  – растягивающее усилие в основе;  $b$  – ширина покрытия по поперечному сечению образца.

Составляющие деформации по оси  $z$  для покрытия и основы могут быть определены как  $\epsilon_{nz} = dU_n/dz$  и  $\epsilon_{0z} = dU_0/dz$  соответственно, где  $U_n$ ,  $U_0$  – перемещения центров тяжести сечений покрытия и основы (рис. 2).

В сечении  $z = 0$  касательные напряжения  $\tau = 0$ . Соответственно из закона Гука следует, что:

$$\frac{\sigma_n}{E_n} = \frac{dU_n}{dz} = \frac{P_n}{E_n F_n}, \quad \frac{\sigma_0}{E_0} = \frac{dU_0}{dz} = \frac{P_0}{E_0 F_0}, \quad (4)$$

где  $E_n$ ,  $E_0$  – модули упругости материала покрытия и основы;  $F_n$ ,  $F_0$  – площади их поперечного сечения.

Из схемы рис. 2 находим углы сдвигов перемещений центров тяжести основы и покрытия

$$\gamma_0 = \frac{\tau_0}{\sigma_0} = -\frac{2(U_0 - U)}{H}, \quad \gamma_n = \frac{\tau_n}{\sigma_n} = \frac{2(U - U_n)}{h}, \quad (5)$$

где  $U$  – перемещение центра тяжести на границе раздела диаграммы напряжений. Полагая, что  $\tau_0 = \tau_n$ , получаем

$$U = \frac{\sigma_0 U_0 / H - \sigma_n U_n / h}{\sigma_0 / H - \sigma_n / h}.$$

Дифференцируем (4) по  $z$ :

$$\frac{dP_n}{dz} = E_n F_n \frac{d^2 U_n}{dz^2}, \quad \frac{dP_0}{dz} = E_0 F_0 \frac{d^2 U_0}{dz^2}. \quad (6)$$

Внося (6) в (3), получим

$$\tau_n = -\frac{E_n F_n}{b} \cdot \frac{d^2 U_n}{dz^2}, \quad \tau_0 = \frac{E_0 F_0}{2b} \cdot \frac{d^2 U_0}{dz^2}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), найдем

$$\begin{aligned} \frac{d^2 U_0}{dz^2} - \frac{4bL}{E_0 F_0} (U_0 - U_n) &= 0, \\ \frac{d^2 U_n}{dz^2} - \frac{2bL}{E_n F_n} (U_0 - U_n) &= 0, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $L = \frac{\sigma_0}{H} \cdot \frac{\sigma_n}{h} / (\frac{\sigma_0}{H} - \frac{\sigma_n}{h})$  – коэффициент, зависящий от напряжений, толщины основы и покрытия.

Вычитая второе уравнение из первого в (8), получим

$$\frac{d^2}{dz^2} (U_0 - U_n) - K^2 (U_0 - U_n) = 0, \quad (9)$$

где  $K^2 = \frac{2bL}{\cos \alpha} \left( \frac{1}{E_n F_n} + \frac{2}{E_0 F_0} \right)$  – коэффициент, зависящий от геометрических параметров, модулей упругости покрытия и основы.

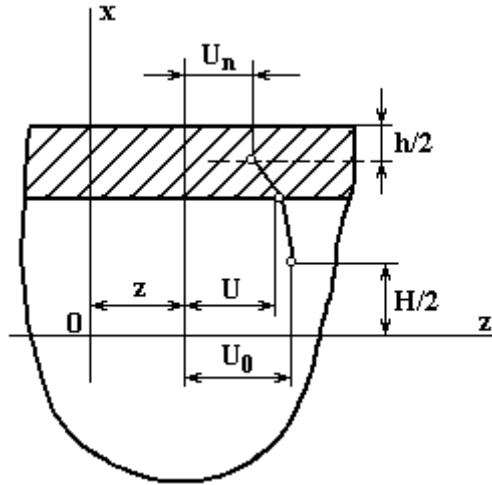


Рис. 2. Схема перемещения центров тяжести сечений основы и покрытия:  $h/2$  – толщина покрытия;  $H/2$  – толщина основы;  $U_0$ ,  $U_n$  – перемещение центров тяжести сечений основы и покрытия;  $U$  – перемещение центра тяжести сечения на границе раздела;  $z$  – расстояние от середины покрытия до произвольного сечения  $a$  –  $a$

Решение уравнения (9) имеет вид

$$U_0 - U_n = \frac{P_0 \cdot sh(Kz)}{E_0 F_0 K \cdot ch(Kl)}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (8), находим

$$\frac{d^2 U_0}{dz^2} = \frac{4bL P_0 \cdot sh(Kz)}{(E_0 F_0)^2 K \cdot ch(Kl)},$$

$$\frac{d^2 U_n}{dz^2} = \frac{2 b L P_0 \cdot sh(Kz)}{E_0 F_0 E_n F_n K \cdot ch(Kl)}. \quad (11)$$

Из (7) и (11) следует

$$\tau_n = - \frac{2 L P_0 \cdot sh(Kz)}{E_0 F_0 K \cdot ch(Kl)}. \quad (12)$$

Вносим (12) в (1), интегрируем и получаем

$$\sigma_n = \frac{2 L P_0 \cdot ch(Kz)}{E_0 F_0 K^2 h \cos \alpha \cdot ch(Kl)} + C. \quad (13)$$

Если  $z = l$ ,  $\sigma_n = 0$ , тогда  $C = \frac{2 L P_0}{E_0 F_0 h K^2 \cos \alpha}$ ,

$$\sigma_n = \frac{2 \varepsilon_0 L}{h K^2 \cos \alpha} \left( 1 - \frac{ch(Kz)}{ch(Kl)} \right), \quad (14)$$

где  $\varepsilon_0 = P_0/E_0 F_0$  – относительное удлинение основы.

Подставляя в (14) значения  $K^2$ , имеем

$$\sigma_n = \frac{\varepsilon_0}{F_n \left( \frac{1}{E_n F_n} + \frac{2}{E_0 F_0} \right)} \cdot \left[ 1 - \frac{ch(Kz)}{ch(Kl)} \right]. \quad (15)$$

Касательные напряжения на границе основы и покрытия определяются как

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 K}{\left( \frac{1}{E_n F_n} + \frac{2}{E_0 F_0} \right)} \cdot \frac{sh(Kz)}{ch(Kl)}. \quad (16)$$

Анализ уравнения (15) показывает, что нормальные напряжения, определяющие когезионную прочность соединения основы и покрытия, в зависимости от положения рассматриваемого сечения имеют не постоянные, а возрастающие значения от нуля у кромки покрытия до максимального  $\sigma_n \approx \sigma_s$  значения, образуя участок, за пределами которого  $\sigma_n > \sigma_s$  ( $\sigma_s$  – предел прочности).

Из уравнения (16) следует, что касательные напряжения на границе основы и покрытия в зависимости от положения рассматриваемого сечения имеют не постоянные, а уменьшающиеся значения от  $\tau_{\max}$  у кромки покрытия до нуля. Влияние угла  $\alpha$  оценивается как уменьшающее численное значение напряжения  $\tau_n$ , что предсказывает положительные свойства в условиях трибосистемы (повышенные износостойкости).

#### 4. Экспериментальные результаты

Экспериментальная проверка расчета напряженного состояния на границе раздела основа–покрытие проводилась на пластине с двухсторонним покрытием, нанесенным электродом из твердого сплава Т5К10, адгезионная прочность которого значительно превышает когезионную. В результате фрактографического исследования контактной поверхности хрупкого покрытия на стали в условиях критических деформаций установлено, что на поверхности металла после разрушения покрытия оставались участки («островки»), прочно соединенные с основой. Статистическая обработка размеров «островков» показала, что среднее отношение их ширины  $a$  к диаметру  $D$  составляет 0,61 при дисперсии 0,33. Шаг между трещинами совпадает с характерным размером  $N$ , определяющим расстояние от кромки покрытия до участка, на котором величина напряжения асимптотически приближается к когезионной прочности покрытия  $\sigma_n/\sigma_s \rightarrow 1$ . На рис. 3 представлен общий вид разрушения на поверхности покрытия.

Размер  $N$  для данного конструкционного материала с покрытием определяем, используя формулу (15) при условии, что напряжение, влияющее на образование трещин в покрытии, приближается по величине к пределу его прочности  $\sigma_n \rightarrow \sigma_s$ . Полученные экспериментальные результаты позволяют оценить максимальное значение соотношения  $\sigma_n/\sigma_s = 0,95$  (рис. 4). Обозначив для простоты

$$M = \frac{\varepsilon_0}{F_n (1/E_n F_n + 2/E_0 F_0)},$$

определяем  $\frac{\sigma_n}{\sigma_0} = \frac{M [1 - chK (l - N / chKl)]}{M [1 - chK (l - N) / chK (\infty)]} = 0,95$  при условии, что напряжение в

покрытии равно  $\sigma_0$ , а  $l \approx N$ . Устремляя  $(l - N) \rightarrow 0$ , имеем

$$1 - \frac{chK (l - N)}{chKl} = 0,95. \quad (17)$$

Преобразовав формулу (17) и логарифмируя, получаем

$$-KN = \ln 0,05; N = \frac{\ln 20}{K}.$$

Отсюда следует, что могут быть разработаны такие рабочие поверхности ответственных деталей с покрытиями, на которых напряжения достигают  $\sigma_0$  за счет небольшой длины адгезионного контакта основы с покрытием.

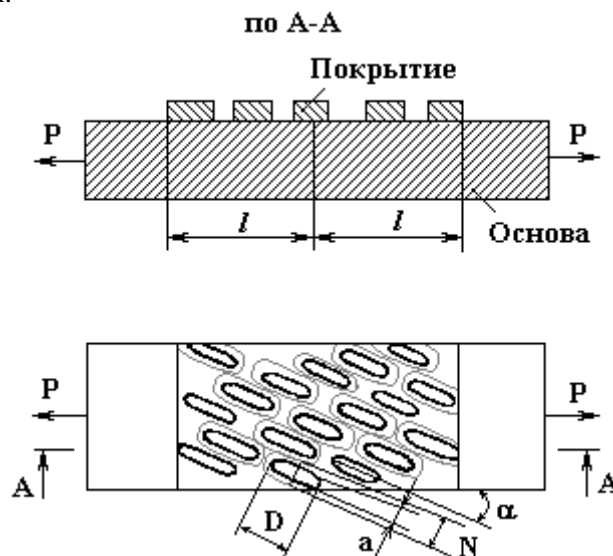


Рис.3. Поверхностное разрушение сплошного покрытия в условиях критических деформаций

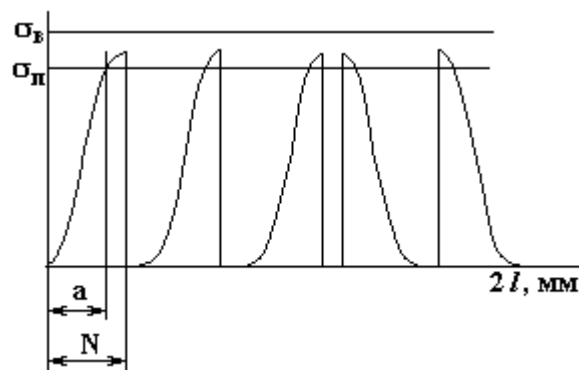


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений от кромки покрытия по его длине  $2l$

## 5. Проектирование поверхности трения образца

В соответствии с результатами расчетов напряженного состояния и экспериментальными данными выполнено проектирование поверхности трения образца с образованием регулярного «островкового» микрорельефа. Принимались следующие конструктивные размеры и материалы образцов: основание колодки – из стали 45, толщина стенки  $H = 15$  мм, ширина  $b = 20$  мм,  $\sigma_0 = 100$  МПа,  $E_0 = 200\,000$  МПа. На двух группах образцов методом ЭИЛ наносилось покрытие материалами: на первом образце ВК6М толщиной  $h = 0,08$  мм,  $\sigma_n = 135$  МПа,  $E_n = 500\,000$  МПа; на втором – Т5К10 толщиной  $h = 0,08$  мм,  $\sigma_n = 140$  МПа,  $E_n = 450\,000$  МПа [9].

Для обоих материалов электродов размеры регулярно расположенных локальных участков («островков») принимали равными  $N = 7$  мм,  $D = 10$  мм и к направлению скольжения  $\alpha = 5$  и  $15^\circ$ . Возможные варианты расположения локальных упрочняющих участков на рабочей поверхности развертки показаны на рис. 5. При этом суммарная площадь заполненных металлом участков покрытия при сравнении с номинальной поверхностью для варианта 1 составляет  $F_n = 0,62 F_{\text{ном}}$ , для варианта 2 –  $F_n = 0,47 F_{\text{ном}}$ .

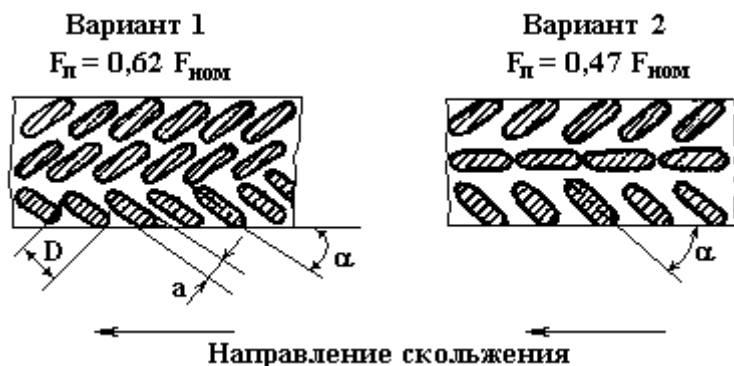
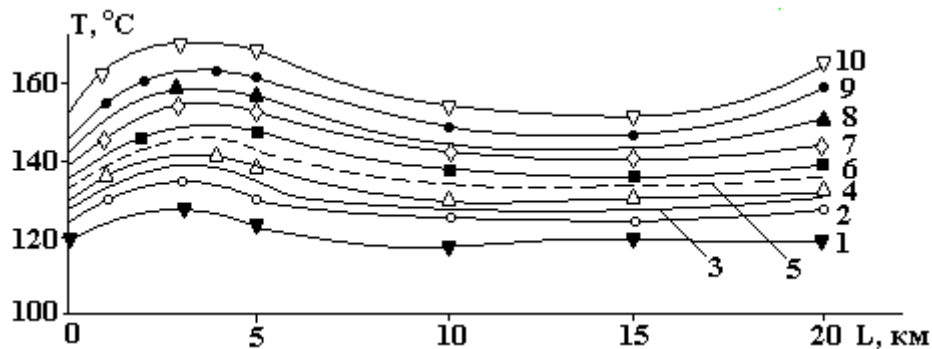


Рис. 5. Развертка поверхности подшипника скольжения с вариантами регулярного расположения выступов («островков»)

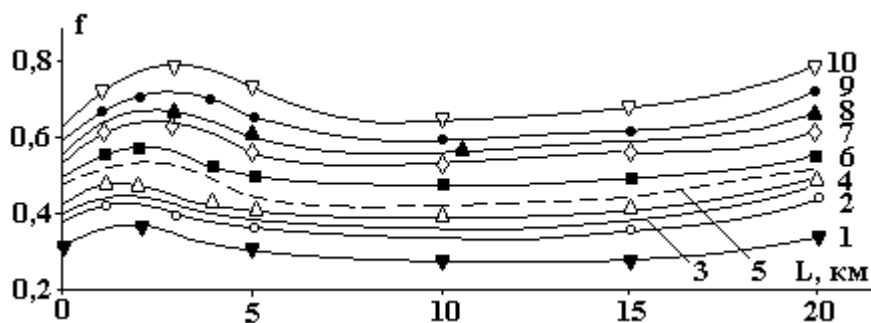
### 6. Обсуждение результатов

В таблице приведены основные триботехнические характеристики покрытий в зависимости от вида образуемого микрорельефа, материала электрода для ЭИЛ, расположения локальных участков упрочненных покрытий и эффективности образования специальных микрорельефов.

Результаты испытаний на износостойкость (рис. 6) показывают, что зависимости температуры в зоне трения (рис. 6,а), коэффициентов трения (рис. 6,б), величины износа поверхности (рис. 6,в) от пути трения согласуются между собой: большему износу для сплошного покрытия электродными материалами ВК6М и Т5К10 соответствуют большие значения коэффициентов трения и температур; меньшим значениям износа для покрытий, образованных по первому варианту, соответствуют меньшие значения коэффициентов трения и температур. Зависимость износа от пути трения (рис. 6,в) показывает наличие трех участков при износе: приработки, нормального изнашивания и возможного начала изнашивания поверхности при катастрофическом износе (для зависимости 10).



а



б

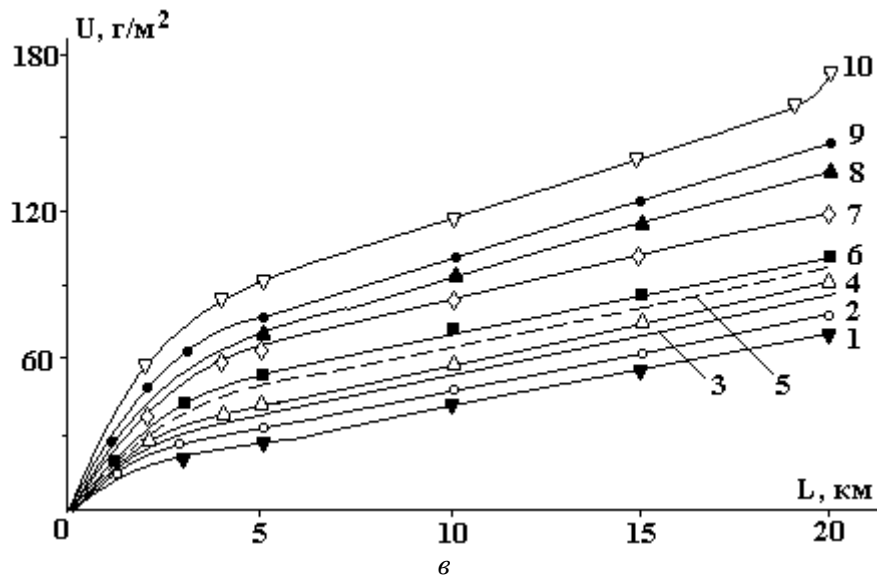


Рис. 6. Зависимости температуры в зоне трения (а), коэффициентов трения (б), износа поверхности (в) от пути трения для вариантов покрытий материалами: 1 – ВК6М (вар.1,  $\alpha=15^\circ$ ); 2 – ВК6М (вар.1,  $\alpha=5^\circ$ ); 3 – Т5К10 (вар.1,  $\alpha=15^\circ$ ); 4 – Т5К10 (вар.1,  $\alpha=5^\circ$ ); 5 – ВК6М (вар.2,  $\alpha=15^\circ$ ); 6 – ВК6М (вар.2,  $\alpha=5^\circ$ ); 7 – Т5К10 (вар.2,  $\alpha=15^\circ$ ); 8 – Т5К10 (вар.2,  $\alpha=5^\circ$ ); 9 – ВК6М (сплошное покрытие); 10 – Т5К10 (сплошное покрытие)

#### Триботехнические характеристики покрытий

Триботехнические характеристики, ресурс и эффективность покрытий	Варианты расположения участков на основе									
	$F_n=0,62F_{\text{ном}}$				$F_n=0,47F_{\text{ном}}$				Сплошное покрытие	
	$\alpha=5^\circ$	$15^\circ$	$5^\circ$	$15^\circ$	$5^\circ$	$15^\circ$	$5^\circ$	$15^\circ$		
ВК6М	Т5К10	ВК6М	Т5К10	ВК6М	Т5К10	ВК6М	Т5К10	ВК6М	Т5К10	
<i>Участок приработки</i>										
Средняя длительность приработки, $L_{np}$ , км	0,9	0,7	1,7	1,5	1,0	0,8	1,8	1,6	4,0	4,1
Наибольший коэффициент трения, $f$	0,41	0,36	0,45	0,41	0,56	0,51	0,65	0,63	0,72	0,78
Наибольшая температура, $T^\circ\text{C}$	132	125	138	130	150	148	138	132	160	170
<i>Участок нормального износа</i>										
Продолжительность износа, $L_{из}$ , км	19,1	19,3	18,3	18,5	19,0	19,2	18,2	18,4	16,0	14,8
Скорость изнашивания, $J_{из}$ , $\text{г/м}^2\text{км}$	2,87	2,84	3,21	3,05	2,88	2,86	3,31	3,16	4,69	5,16
Коэффициент трения, $f$	0,31	0,28	0,39	0,34	0,48	0,43	0,58	0,53	0,60	0,64
Температура участка, $T^\circ\text{C}$	126	120	130	125	141	135	146	140	148	152
Ресурс работы, км	48,5	51,4	40,5	42,8	45,3	47,5	38,4	40,1	33,2	29,1
Повышение износостойкости по сравнению со сплошным покрытием, раз	1,46	1,55	1,39	1,47	1,36	1,43	1,32	1,36	1,0	1,0

### Анализ полученных результатов

1. В значительной мере сократилась продолжительность участка приработки (с 4,0 – 4,1 для сплошного покрытия до 0,7 – 1,7 км для покрытий по первому варианту).

2. На участке приработки в связи с лучшими условиями формирования рабочих контактирующих поверхностей для образцов со специальными микрорельефами по сравнению со сплошными покрытиями установлено уменьшение коэффициентов трения (с 0,72 – 0,78 до 0,36 – 0,45) и температуры (с 160 – 170 до 125 – 138°C).

3. Для образцов со специальными микрорельефами по сравнению с имеющими сплошное покрытие на участке нормального износа, повысилась его продолжительность (с 14,8–16,0 до 19,1–19,3 км), значительно уменьшилась скорость изнашивания (с 4,69–5,16 до 2,84–3,21 г/м<sup>2</sup>·км), коэффициенты трения (с 0,60 – 0,64 до 0,28 – 0,39), температура (с 148–152 до 120 – 130°C), значительно увеличился ресурс работы покрытия (с 29,1–33,2 до 48,5–51,4 км). Повышение износостойкости образцов с образованными специальными микрорельефами по сравнению с имеющими сплошное покрытие, достигнуто в 1,46 – 1,55 раза.

### Выводы

Образование несплошных покрытий ЭИЛ определенной микрогеометрии в виде «островков» с суммарной площадью заполненных металлом участков до 62% от номинальной площади повышает износостойкость по сравнению со сплошным покрытием в 1,46 – 1,55 раза.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лазаренко Б.Р. Некоторые научные проблемы электрической эрозии материалов // Электронная обработка материалов. 1969. № 2. С. 7–11.
2. Ляшенко Б.А. О критериях адгезионно-когезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий // Проблемы прочности. 1980. № 5. С. 114–117.
3. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М., 2001.
4. Ришин В.В. Исследование прочности сцепления некоторых защитных неорганических покрытий при комнатной и высоких температурах. Автореф. дисс. канд. техн. наук. Киев, 1973.
5. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов. Новосибирск, 1995.
6. Верхотуров А.Д., Мулин Ю.И., Власенко В.Д. Повышение износостойкости покрытий за счет формирования специального микрорельефа при электроискровом легировании // Физика и химия обработки материалов. 2003. № 2. С.70–75.
7. Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф. Электродные материалы для электроискрового легирования. М., 1988.
8. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М., 1979.
9. Справочник металлиста. Т.3. М., 1960.

Поступила 30.04.04

### Summary

Some results of the investigation of the stressed-deformable state on the boundary of the material base and the cover, formed while electrosparking alloying, are given. Calculation results and the comparative wear tests show a possibility of the increase of the cover strength on account of the formation of the special microgeometry.