

## **ФИЗИКА ТРЕНИЯ И ИЗНОСА**

УДК 537.311.4

### **МЕХАНИЗМ ДЕГРАДАЦИИ ЗАМКНУТЫХ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ОЦЕНКА ИХ СРОКА СЛУЖБЫ**

**В. В. Измайлов, М. В. Новоселова**

Тверской государственной технический университет

На основании диффузионной модели процесса деградации единичных контактов получены зависимости роста электросопротивления контактного соединения во времени. Предложены формулы для оценки срока службы замкнутых электроконтактных соединений. Адекватность модели подтверждается экспериментальными данными.

*Ключевые слова:* электрический контакт, электросопротивление, деградация контакта, срок службы

**1. Введение.** Известно, что электрическое сопротивление замкнутых электрических контактов в среднем имеет тенденцию к увеличению с ростом длительности периода эксплуатации [1]. Одной из первых работ, посвященных теоретическому анализу этого явления, была статья Т. Такао и К. Маю [2]. В ней на основании диффузионной модели окисления контактного пятна предложена формула для оценки срока службы контакта. В работе [3] было выдвинуто предположение, что скорость уменьшения радиуса проводящего металлического пятна равна скорости роста толщины пленки окисла на свободной поверхности контактирующих деталей, а число пятен фактического контакта постоянно. Такие предположения не основываются на каких-либо физических механизмах процесса. Нами ранее было выдвинуто предположение о том, что рост сопротивления единичного контакта связан с увеличением толщины поверхностной пленки за счет диффузии окислителя (не обязательно кислорода) вдоль поверхности контакта [4]. Позднее аналогичная модель использована в работах [5–7].

В модели [7] предполагается, что оксидная пленка растет с периферии контакта внутрь пятна контакта, а в центре остается неокисленный (металлический) участок. Считается, что окисление происходит за счет миграции ионов через кольцевую зону окисленного контакта. В предложенной нами модели предполагается, что оксидная пленка растет *по всей площади пятна контакта*, но толщина ее

неравномерна: в центре пленка тоньше, ближе к периферии толщина пленки увеличивается. В этом смысле к нашему подходу ближе модель [8].

В данной статье на основании развития предложенной нами ранее диффузионной модели процесса окисления единичного пятна контакта [9, 10] приводятся уточненные зависимости, описывающие уменьшение радиуса квазиметаллического пятна контакта во времени и, как следствие, рост сопротивления единичного и множественного контакта. На основании этих зависимостей предложены формулы для оценки срока службы замкнутых электрических контактов.

**2. Модель деградации единичного пятна контакта.** Суть предлагаемой модели деградации единичного пятна контакта заключается в следующем. Окисление пятна контакта двух контактирующих выступов сопряженных поверхностей можно считать сходным с окислением по границам зерен металла. Известно, что окисление по границам зерен происходит гораздо интенсивнее, чем в объеме металла. Это объясняется диффузией окислителя вдоль границ, хотя обычно окисление металлов обусловлено диффузией ионов металла на поверхность через окисел [11]. Поверхность контакта двух одинаковых, а тем более разных металлов, очевидно, не менее благоприятна для движения ионов, чем граница зерен. Поэтому один из возможных механизмов окисления пятен фактического контакта – диффузия окислителя вдоль поверхности контакта.

Рост поверхностной пленки на пятне контакта за счет диффузии окислителя с границы пятна к его центру схематически иллюстрирует рис. 1. Со временем концентрация окислителя и соответственно толщина поверхностной пленки увеличиваются и становятся более равномерными по радиусу пятна контакта.



Р и с . 1. Схема роста поверхностной пленки на пятне контакта за счет диффузии окислителя

Дифференциальное уравнение радиального диффузионного потока имеет вид [12]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \right], \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация оксиданта на расстоянии  $r$  от центра пятна;  $t$  – время;  $D$  – коэффициент диффузии оксиданта вдоль поверхности контакта.

Граничное и начальное условия в данном случае следующие:

$$\begin{aligned} C &= C_m \text{ при } r = a \text{ для всех } t; \\ C &= 0 \text{ при } 0 < r < a \text{ при } t = 0, \end{aligned}$$

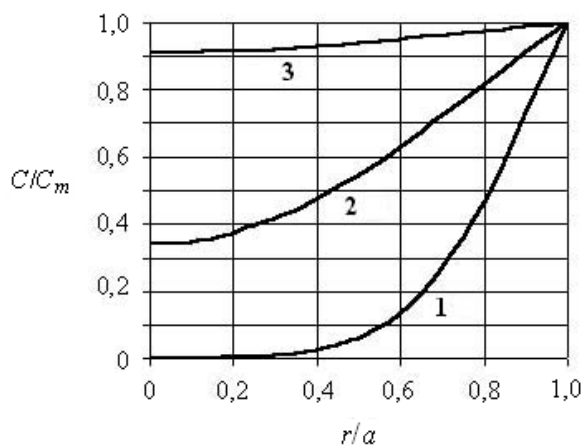
где  $a$  – радиус пятна контакта;  $r$  – текущее значение радиуса ( $0 \leq r \leq a$ );  $C_m$  – концентрация окислителя за пределами контакта при  $r \geq a$ .

Решение дифференциального уравнения диффузии (1) при заданных граничном и начальном условиях выражается через функции Бесселя нулевого  $J_0(x)$  и первого  $J_1(x)$  порядков [12]:

$$C = C_m \left[ 1 - 2 \sum_1^{\infty} \frac{1}{\alpha_n} \frac{J_0(\alpha_n r/a)}{J_1(\alpha_n)} \exp\left(-\frac{D\alpha_n^2 t}{a^2}\right) \right], \quad (2)$$

где  $\alpha_n$  – корни уравнения  $J_0(\alpha_n a) = 0$ .

Изменение распределения концентрации окислителя по поверхности пятна контакта со временем согласно формуле (2) показано на рис. 2. Постепенно распределение концентрации становится более равномерным.



Р и с . 2. Зависимость относительной концентрации окислителя  $C/C_m$  от относительного радиуса площадки контакта  $r/a$  при различных значениях безразмерного времени  $Dt/a^2$ : 1 – 0,03; 2 – 0,15; 3 – 0,50

Будем считать, что толщина пленки  $\delta$  на поверхности пятна контакта пропорциональна концентрации  $C$  окислителя, то есть описывается аналогичным уравнением

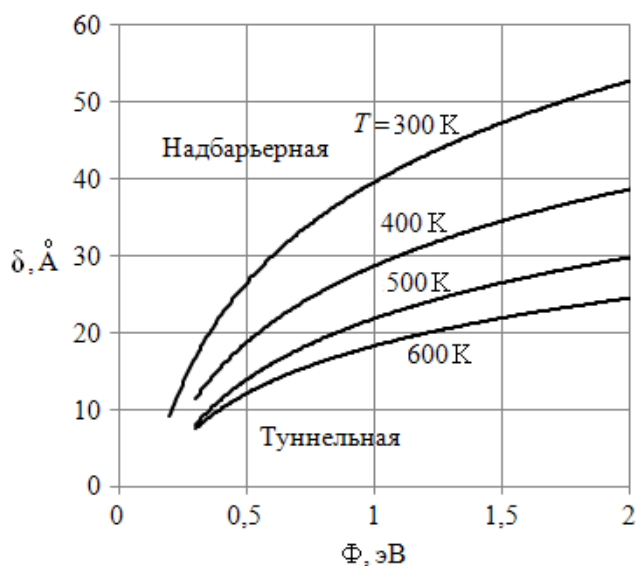
$$\delta = \delta_m \left[ 1 - 2 \sum_1^{\infty} \frac{1}{\alpha_n} \frac{J_0(\alpha_n r/a)}{J_1(\alpha_n)} \exp\left(-\frac{D\alpha_n^2 t}{a^2}\right) \right], \quad (3)$$

где  $\delta$  – толщина пленки на расстоянии  $r$  от центра пятна;  $\delta_m$  – толщина пленки на свободной поверхности пятна контакта.

С ростом температуры скорость роста пленки, согласно предложенной модели, должна увеличиваться за счет увеличения коэффициента диффузии окислителя.

### 3. Изменение переходного сопротивления во времени.

Изменение сопротивления окисляющегося контакта во времени связано с изменением туннельной и надбарьерной (термоионной) проводимости образующейся оксидной пленки. Туннельная проводимость преобладает при достаточно тонких пленках и малых температурах, надбарьерная – при толстых пленках и повышенных температурах (рис. 3, линии разграничивают области преобладания различных механизмов проводимости при соответствующей температуре).



Р и с . 3. Области преобладания механизмов проводимости в зависимости от температуры  $T$ , толщины пленки  $\delta$  и высоты потенциального барьера  $\Phi$

Уравнения для туннельной и надбарьерной проводимости единицы площади контакта соответственно имеют вид [13]:

$$\lambda_t = \frac{e^2 \sqrt{2m\Phi}}{h^2 \delta} \exp\left(-\frac{4\pi\delta\sqrt{2m\Phi}}{h}\right),$$

$$\lambda_n = AT^2 \frac{e}{k_B T} \exp\left(-\frac{\Phi}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{e^2 \ln 2}{k_B T \epsilon \delta}\right),$$

где  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона;  $\Phi$  – высота потенциального барьера;  $h$  – постоянная Планка;  $A$  – постоянная Ричардсона;  $T$  – абсолютная температура поверхности контакта;  $k_B$  – постоянная Больцмана;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость пленки. В упрощенной форме уравнения имеют вид:

$$\lambda_t [\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-2}] = 3 \cdot 10^{14} \frac{\sqrt{\Phi}}{\delta} \exp(-\delta\sqrt{\Phi}),$$

$$\lambda_n [\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-2}] = 1,4 \cdot 10^{10} T \exp\left(-\frac{11600\Phi}{T}\right) \exp\left(\frac{11572}{\delta T}\right),$$

где высота барьера  $\Phi$  выражена в электронвольтах, толщина пленки  $\delta$  в ангстремах, температура  $T$  в кельвинах.

Интегрируя выражения в упрощенной форме для проводимости элементарного кольцевого участка пятна контакта радиусом  $r$  и шириной  $dr$  и используя выражение (3), получим выражения для двух составляющих общей проводимости пятна контакта.

Туннельная проводимость:

$$\begin{aligned} \Lambda_t &= a^2 \int_0^1 \lambda_t 2\pi \frac{r}{a} d\left(\frac{r}{a}\right) = \\ &= 6\pi 10^{14} a^2 \sqrt{\Phi} \int_0^1 \frac{\exp(-\delta\sqrt{\Phi})}{\delta} \left(\frac{r}{a}\right) d\left(\frac{r}{a}\right) = \\ &= \frac{6\pi 10^{14} a^2 \sqrt{\Phi}}{\delta_m} I_r. \end{aligned} \quad (4)$$

Надбарьерная проводимость:

$$\begin{aligned} \Lambda_n &= a^2 \int_0^1 \lambda_n 2\pi \frac{r}{a} d\left(\frac{r}{a}\right) = \\ &= 2,8\pi 10^{10} a^2 T \exp\left(-\frac{11600\Phi}{T}\right) \int_0^1 \exp\left(\frac{11572}{\delta T}\right) \left(\frac{r}{a}\right) d\left(\frac{r}{a}\right) = \\ &= 2,8\pi 10^{10} a^2 T \exp\left(-\frac{11600\Phi}{T}\right) I_n. \end{aligned} \quad (5)$$

Интегралы  $I_t$  и  $I_n$  в формулах (4) и (5) не выражаются в элементарных функциях. На рис. 4 представлены значения обратной величины интеграла  $1/I_t$  в функции времени с величиной  $\delta_m \sqrt{\Phi}$  в качестве параметра. На рис. 5 представлены значения обратной величины интеграла  $1/I_n$  в функции времени с величиной  $11572/(\delta_m T)$  в качестве параметра. Очевидно, что аналогичным образом ведут себя временные зависимости туннельного и надбарьерного сопротивления контакта:  $R_t = 1/\Lambda_t \sim 1/I_t$  и  $R_n = 1/\Lambda_n \sim 1/I_n$ . Видно, что спустя некоторое время обе составляющие сопротивления контакта прекращают рост и стабилизируются.

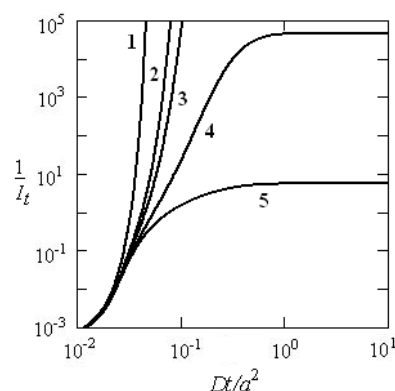


Рис. 4. Значения обратной величины интеграла  $1/I_t$  в зависимости от безразмерного времени  $Dt/a^2$  при различных значениях параметра  $\delta_m \sqrt{\Phi}$ : 1 – 1000; 2 – 100; 3 – 50; 4 – 10; 5 – 1

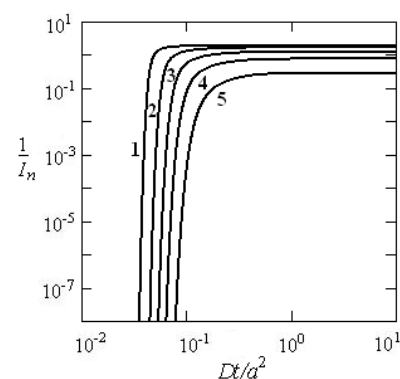


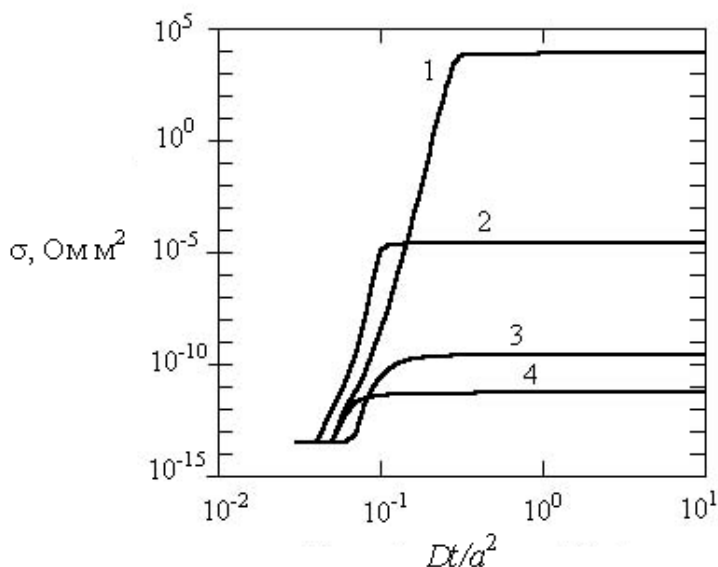
Рис. 5. Значения обратной величины интеграла  $1/I_n$  в зависимости от безразмерного времени  $Dt/a^2$  при различных значениях параметра  $11572/(\delta_m T)$ : 1 – 0,05; 2 – 0,2; 3 – 0,5; 4 – 1; 5 – 2

Общее сопротивление контакта равно

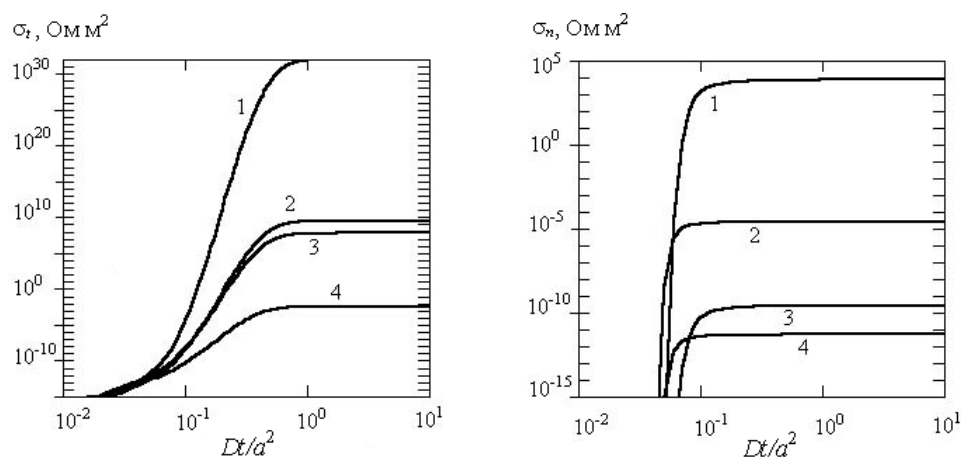
$$R = \frac{1}{\Lambda_t} + \frac{1}{\Lambda_n} + \frac{\rho}{2a} \quad (6)$$

где  $\rho = (\rho_1 + \rho_2)/2$  – среднее удельное сопротивление материалов контакт-деталей. Третье слагаемое представляет собой сопротивление круговой площадки контакта, обусловленное стягиванием к ней линий тока [1].

В качестве примера на рис. 6–8 показано изменение во времени сопротивления единицы площади окисленного контакта  $\sigma$ , его туннельной  $\sigma_t$  и надбарьерной  $\sigma_n$  составляющих. Расчеты выполнены по формуле (6) для параметров контакта:  $\rho = 2 \cdot 10^{-8}$  Ом·м,  $a = 10$  мкм. Значения высоты барьера, максимальной толщины пленки и температуры в контакте приведены в подписях к рисункам.



Р и с . 6. Изменение во времени сопротивления единицы площади  $\sigma$  окисленного контакта: 1 –  $\Phi = 1$  эВ,  $T = 300$  К,  $\delta_m = 50$  Å; 2 –  $\Phi = 1$  эВ,  $T = 600$  К,  $\delta_m = 100$  Å; 3 –  $\Phi = 0,2$  эВ,  $T = 300$  К,  $\delta_m = 50$  Å; 4 –  $\Phi = 0,2$  эВ,  $T = 600$  К,  $\delta_m = 100$  Å



Р и с . 7. Изменение во времени туннельного сопротивления  $\sigma_t$ , единицы площади окисленного контакта: 1 –  $\Phi = 1$  эВ,  $\delta_m = 100$  Å; 2 –  $\Phi = 1$  эВ,  $\delta_m = 50$  Å; 3 –  $\Phi = 0,2$  эВ,  $\delta_m = 100$  Å; 4 –  $\Phi = 0,2$  эВ,  $\delta_m = 50$  Å

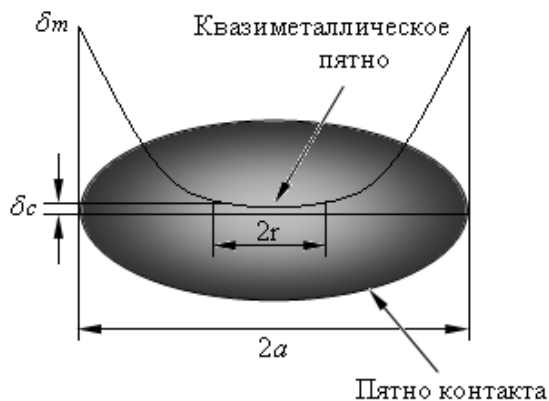
Р и с . 8. Изменение во времени надбарьерного сопротивления  $\sigma_n$  единицы площади окисленного контакта: 1 –  $\Phi = 1$  эВ,  $T = 300$  К,  $\delta_m = 50$  Å; 2 –  $\Phi = 1$  эВ,  $T = 600$  К,  $\delta_m = 100$  Å; 3 –  $\Phi = 0,2$  эВ,  $T = 300$  К,  $\delta_m = 50$  Å; 4 –  $\Phi = 0,2$  эВ,  $T = 600$  К,  $\delta_m = 100$  Å

#### 4. Деграция единичного и множественного контакта.

Электрический контакт двух контакт-деталей представляет собой совокупность дискретных пятен контакта, образованных контактирующими неровностями поверхности. На поверхности единичного пятна контакта за счет диффузии оксиданта вдоль границы контакта происходит рост поверхностной непроводящей пленки. В центре пятна существует квазиметаллический участок, где толщина пленки незначительна и проводимость которого за счет туннельного и надбарьерного механизмов достаточно велика, по крайней мере, не меньше омической проводимости. По мере роста толщины пленки радиус квазиметаллического проводящего пятна уменьшается со временем (рис. 9). Согласно формуле (3), поверхностная пленка растет по всей площади пятна контакта, однако ее толщина неравномерна: наибольшая толщина при  $r = a$  и наименьшая при  $r = 0$ . С течением времени толщина пленки выравнивается. Известно, что очень тонкие пленки оказывают малое сопротивление прохождению электрического тока. При некотором значении толщины пленки  $\delta \leq \delta_c$  контакт можно считать квазиметаллическим, так как сопротивление пленки меньше сопротивления стягивания линий тока. Так как с ростом толщины

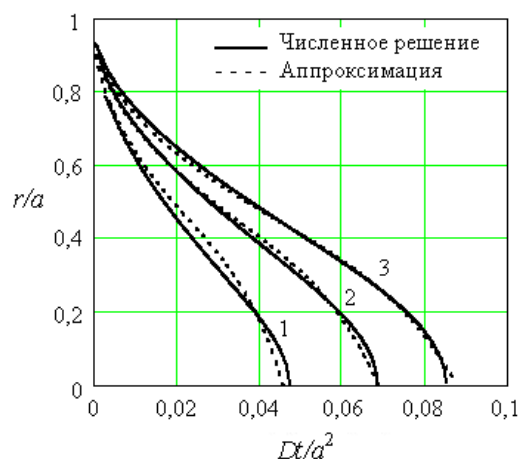


пленки сопротивление быстро растет, будем считать пленку при  $\delta > \delta_c$  практически непроводящей. Тогда из уравнения (3) можно получить зависимость радиуса проводящего квазиметаллического проводящего пятна контакта от времени.



Р и с . 9. Схема контактного пятна с поверхностной пленкой переменной толщины

При этом в явном виде аналитически выразить временную зависимость относительного радиуса квазиметаллического пятна  $r/a$  из уравнения (3) невозможно. Поэтому данное уравнение решалось численно относительно величины  $r/a$  для значений  $\delta_c/\delta_m$ , лежащих в интервале  $0,01 \dots 0,1$ , представляющем практический интерес, с последующей аппроксимацией результатов решения. При решении учитывалось десять корней  $\alpha_n$  функции Бесселя ( $n = 10$ ). В результате получены зависимости относительного радиуса квазиметаллического пятна  $r/a$  от безразмерного времени  $Dt/a^2$  с величиной  $\delta_c/\delta_m$  в качестве параметра (рис. 10).



Р и с . 10. Зависимость относительного радиуса пятна контакта  $r/a$  от безразмерного времени  $Dt/a^2$  при различных значениях параметра  $\delta_c/\delta_m$ : 1 – 0,01; 2 – 0,05; 3 – 0,10

Для аналитического описания результатов численного решения уравнения (3) подобрана аппроксимирующая формула, обеспечивающая наилучшее схождение с численным решением:

$$r(t) = a \left[ 1 - 0,77 \left( \frac{K_\delta D}{a^2} t \right)^{0,5} - 0,23 \left( \frac{K_\delta D}{a^2} t \right)^6 \right], \quad (7)$$

где  $K_\delta = [1 - 4,5 \ln(\delta_c/\delta_m)]$  – коэффициент аппроксимации;  $\delta_c$  – толщина пленки на границе квазиметаллического участка;  $\delta_m$  – толщина пленки на свободной поверхности пятна контакта.

Сравнение аппроксимирующей зависимости (7) с результатами численного решения уравнения (3) представлено на рис. 10.

Следуя Р. Хольму [1] и считая, что проводимость контакта определяется в основном проводимостью квазиметаллического участка, получаем на основании уравнения (7) для зависимости сопротивления от относительного времени  $t/t_m$ , где  $t_m = a^2 / (K_\delta D)$ :

$$Rl(t) = \frac{\rho}{2r(t)} = \frac{R_0}{1 - 0,77(t/t_m)^{0,5} - 0,23(t/t_m)^6}, \quad (8)$$

где  $R_0 = \rho/2a$  – начальное сопротивление неокисленного пятна контакта.

Как видно из формулы (8), при  $t \rightarrow t_m$  сопротивление единичного контакта стремится к бесконечности. На самом деле это не так. При достаточно больших значениях времени пятно контакта покрыто

пленкой, имеющей большое, но не бесконечное сопротивление (см. рис. 6). Кроме того, при определенном напряжении на контакте наступает фриттинг пленки. Однако в данном случае это не существенно, так как такие контакты можно считать отказавшими.

Формула (8) описывает рост сопротивления единичного пятна контакта. Для множественного контакта будем исходить из формулы [1]

$$R(t) = \frac{\rho}{2n(t)r(t)},$$

где  $r(t)$  – средний радиус квазиметаллического пятна контакта;  $n(t)$  – число пятен контакта. Будем считать, что радиус каждого квазиметаллического пятна меняется со временем по формуле (7). Примем еще одно допущение: вид функции распределения радиусов пятен контакта не меняется со временем, так что соотношение среднего и максимального радиусов пятен контакта остается постоянным  $r(t)/a = r_m(t)/a_m$ , где  $a$  – начальное значение среднего радиуса;  $a_m$  – начальное значение максимального радиуса. Кроме того, отношение  $r_m(t)/a_m$  подчиняется уравнению (7). Тогда для среднего радиуса будет справедливо выражение

$$r(t) = a \left[ 1 - 0,77(t/t_m)^{0,5} - 0,23(t/t_m)^6 \right], \quad (9)$$

Число проводящих пятен контакта со временем будет убывать, так как малые пятна будут исчезать из-за окисления. Спустя время  $t$  исчезнут все пятна, начальный радиус которых меньше некоторого критического значения  $a_c = \sqrt{K_8 Dt}$ . Тогда

$$n(t) = n_0 \left( 1 - \int_0^{x_c} f(x) dx \right), \quad (10)$$

где  $f(x)$  – функция распределения радиусов пятен контакта;  $x = a/a_m$ ;  $x_c = a_c/a_m$ .

Рассмотрим два примера функций распределения пятен контакта по размерам. Пусть  $f(x) = 1$  (равномерное распределение). Тогда, согласно формулам (9) и (10), имеем:

$$R(t) = \frac{Rl(t)}{1 - (t/t_m)^{0,5}}. \quad (11)$$

Пусть  $f(x) = 6x(1 - x)$  (бета-распределение). Тогда по формулам (9) и (10) имеем:

$$R(t) = \frac{Rl(t)}{1 - 3(t/t_m) + 2(t/t_m)^{1,5}}. \quad (12)$$

В формулах (11) и (12)  $R_1(t)$  – сопротивление единичного пятна контакта, рассчитываемое по формуле (8).

Рис. 11 в безразмерных координатах иллюстрирует связь между относительным увеличением сопротивления контакта  $k = R/R_0$  и относительным временем  $t/t_m$ . Зависимости построены по результатам расчетов по формулам (8), (11) и (12). Сопротивление контактов с распределенными по радиусам пятнами (кривые 2, 3) растет быстрее, чем с одинаковыми (кривая 1), что естественно: малые пятна быстро исчезают. По этой же причине сопротивление контакта с равномерным распределением радиусов пятен (кривая 2) сначала растет быстрее, чем с бета-распределением (кривая 3), а затем медленнее: во втором случае меньше как малых пятен, так и больших

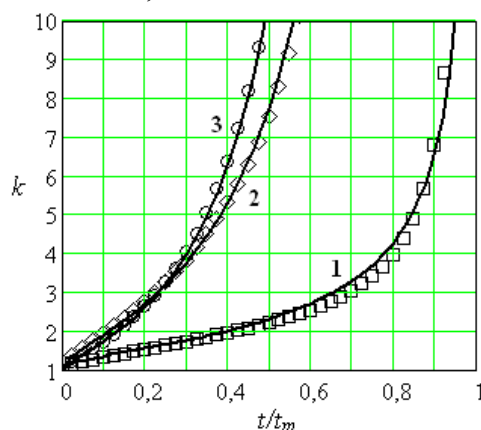


Рис. 11. Связь относительного увеличения сопротивления контакта  $k$  с относительным временем  $t/t_m$ : 1 – единичный контакт; 2 – равномерное распределение размеров пятен контакта; 3 – бета-распределение размеров пятен контакта. Точки – расчет по (8), (11) и (12); линии – по аппроксимирующей формуле (13)

**5. Оценка срока службы контактов.** Как видно из формул (8), (11) и (12) сопротивление контакта  $R \rightarrow \infty$  при  $t \rightarrow t_m$ , следовательно, величину  $t_m = a^2 / (K_8 D)$  можно считать предельным сроком службы контакта. На практике за критерий отказа обычно принимают возрастание сопротивления по сравнению с начальным значением в  $k = R/R_0$  раз. Тогда, численное решение уравнений (8), (11), (12) относительно времени при заданном значении  $k$  позволяет получить оценку срока службы контакта.

Для аналитического расчета срока службы контакта в зависимости от параметра  $k$  подобраны единообразные формулы,

аппроксимирующие численные решения уравнений (8), (11), (12) и обеспечивающие минимальное расхождение с численным решением в диапазоне значений  $k = 1 \div 100$ . Аппроксимирующие формулы для численных решений уравнений (8), (11), (12) имеют общий вид:

$$t = t_m \left(1 - k(t)^{-\alpha}\right)^\beta, \quad (13)$$

где показатели степени  $\alpha = 1,7$  и  $\beta = 2,5$  для однотоочечного контакта;  $\alpha = 0,6$  и  $\beta = 2,0$  для равномерного распределения пятен контакта по размерам;  $\alpha = 0,4$  и  $\beta = 1,4$  для бета-распределения. Зависимости безразмерного срока службы контакта  $t/t_m$  от величины допустимого увеличения контактного сопротивления  $k$  по уравнению (13) изображены на рис. 11 сплошными линиями.

#### **6. Температурная зависимость срока службы контактов.**

Как уже отмечалось, срок службы замкнутых контактов определяется величиной  $t_m = a^2 / (K_8 D)$ , то есть зависит от коэффициента диффузии окислителя по поверхности контакта. Можно предположить, что его величина должна быть близка к значениям коэффициента поверхностной или зернограничной диффузии, и может быть рассчитана по формуле [14–17]

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{B}{\Theta}\right), \quad (14)$$

где  $D_0$  – предэкспоненциальный множитель (частотный фактор);  $B$  – коэффициент, зависящий от механизма диффузии;  $\Theta = T/T_{пл}$  – гомологическая температура контакта;  $T$  – абсолютная температура поверхности контакта;  $T_{пл}$  – температура плавления материала контакт-деталей. На основании литературных данных [14–17] можно принять  $D_0 \approx 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $B \approx 7 \dots 9$ . Большая величина параметра  $B$  соответствует зернограничной диффузии, меньшая – поверхностной диффузии.

Температура контакта при длительном прохождении номинального тока  $I$  зависит от электросопротивления контакта (падения напряжения на контакте  $\Delta U(t)$ )

$$T(t) = \sqrt{T_b^2 + \frac{[\Delta U(t)]^2}{4L}} = T_b \sqrt{1 + \frac{[I \cdot R(t)]^2}{4L \cdot T_b^2}}, \quad (15)$$

где  $T_b$  – объемная температура контакт-деталей;  $L = 2,45 \cdot 10^{-8}$  В<sup>2</sup>/К<sup>2</sup> – число Лоренца.

Введем следующие параметры:  $\Delta T_0^2 = I^2 \cdot R_0^2 / (4L)$ , где  $\Delta T_0$  –

превышение температуры контакта над объемной температурой контакт-деталей в начальный момент времени;  $\Theta_b = T_b/T_{пл}$  – гомологическая объемная температура. С учетом введенных обозначений и формулы (15) выражение (14) примет вид

$$D(t) = D_0 \exp\left(-\frac{B}{\Theta_b \sqrt{1 + (\Delta T_0/T_b)^2 [k(t)]^2}}\right), \quad (16)$$

где  $k(t) = R(t)/R_0$  – безразмерный параметр, характеризующий рост сопротивления контакта со временем (см. формулы (8), (11) и (12)).

Как видно из формулы (16), значение коэффициента диффузии экспоненциально, то есть очень сильно, зависит от температуры. Поэтому срок службы замкнутых контактов также сильно зависит от температуры.

По мере роста сопротивления контакта его температура будет расти (см. выражение (15)), и потому величина коэффициента диффузии будет зависеть от сопротивления (см. выражение (16)). Таким образом, коэффициент диффузии, входящий в уравнения (8), (11) и (12) для расчета сопротивления контакта, в свою очередь оказывается зависящим от рассчитываемого сопротивления. Поэтому данные уравнения можно решить только численным способом методом итераций. Примеры результатов таких расчетов приведены на рис. 12 в виде зависимостей  $k(t)$  для медного электроконтактного соединения, полученных по соотношениям (8), (11) и (16) при следующих параметрах:  $B = 7$ ;  $\Theta_b = 0,22$ ;  $\Delta T_0 = 20$  К;  $T_b = 300$  К. На графиках рис. 12  $t/t_0$  – безразмерное время, где  $t_0 = a^2/(K_0 D_0)$ . На рис. 13 и 14 показано влияние параметров  $\Delta T_0$  и  $\Theta_b$ , входящих в уравнение (16), на рост сопротивления контактного соединения со временем на примере единичного пятна контакта.

Как видно из рис. 12–14, нагрев контакта протекающим током приводит к уменьшению срока службы контактного соединения, причем на срок службы влияют как объемная температура контакт-деталей, так и непосредственно температура зоны контакта. Следует обратить внимание на то обстоятельство, что изначально менее качественное соединение (о чем свидетельствует большее начальное превышение температуры контакта над объемной температурой  $\Delta T_0$ ) имеет значительно меньший срок службы (рис. 13). Объемная температура также очень сильно влияет на срок службы контактного соединения.

Разница объемных температур для медного электроконтактного соединения всего в 10 градусов ( $\Theta_b = 0,22$  и  $\Theta_b = 0,23$ ) приводит к сокращению срока службы почти в 3 раза (рис. 14). Этот факт показывает, насколько важно обеспечить эффективные условия охлаждения контактных соединений.

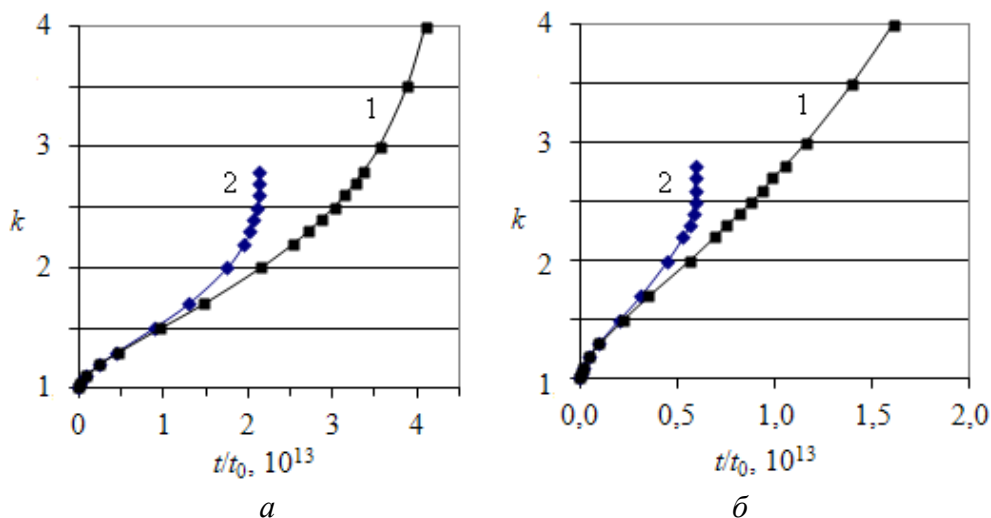
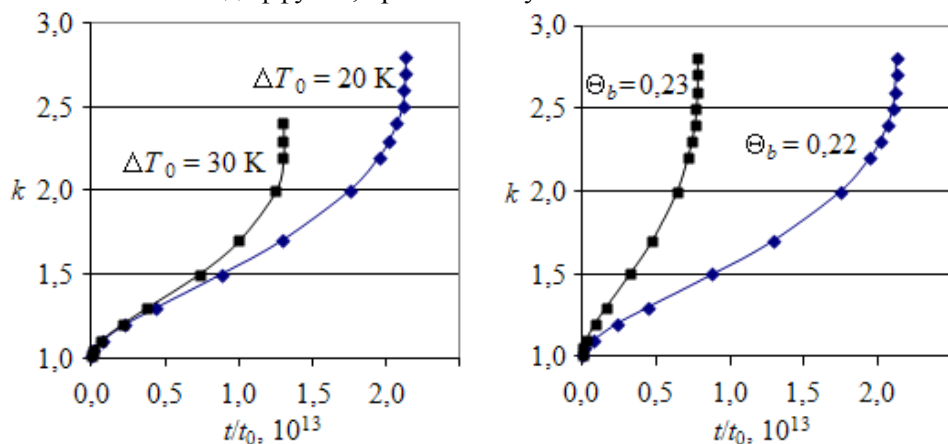


Рис. 12. Влияние температуры контакта на срок службы: а – единичное пятно контакта; б – равномерное распределение пятен контакта по размерам. Кривая 1 – без учета влияния температуры на коэффициент диффузии; кривая 2 – с учетом этого влияния



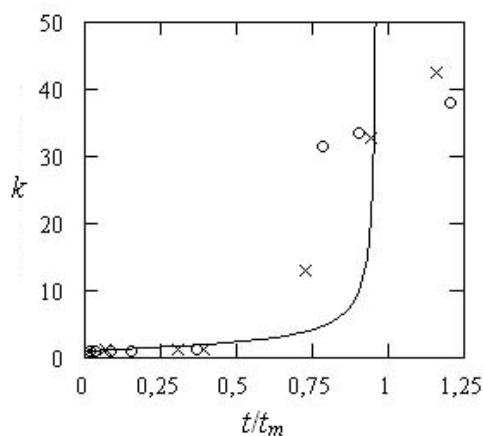
Р и с . 13. Влияние начального превышения температуры контакта  $\Delta T_0$  на срок службы при объемной гомологической температуре контактных деталей  $\Theta_b = 0,22$

Р и с . 14. Влияние объемной гомологической температуры контактных деталей  $\Theta_b$  на срок службы при начальном превышении температуры контакта  $\Delta T_0 = 20$  К

Для оценочных расчетов, чтобы исключить метод итераций, в качестве первого приближения будем считать, что величина коэффициента диффузии определяется максимально допустимой температурой в контакте, при этом будем получать заниженные оценки срока службы контакта.

**7. Экспериментальное исследование времени жизни замкнутых электрических контактов.** Нами исследовалось изменение во времени сопротивления длительного замкнутого единичного контакта. Методика исследования деградации единичного контакта в наших экспериментах была следующая. Изучалось поведение во времени контакта плоских медных образцов с эталонным зондом из сплава  $Ai80\% Si20\%$ . Зонд имеет диаметр 1 мм со сферическим окончанием радиусом 0,5 мм. Нагрузка на зонд задавалась гирями в пределах  $5\div 20$  грамм. Объемная температура деталей контакта автоматически поддерживалась постоянной с точностью  $\pm 5^\circ C$  на уровне 100, 150 или  $200^\circ C$ . Через контакт пропускали постоянный электрический ток силой от 10 мА до 1 А, напряжение на разомкнутом контакте может быть установлено от 20 мВ до 2 В.

На рис. 15 представлены зависимости сопротивления некоторых единичных контактов от времени, полученные в наших экспериментах (точки). Обработка экспериментальных данных по методу наименьших квадратов в соответствии с формулой (13) позволила определить значения предельного срока службы  $t_m$  исследованных контактов:  $t_m = (2,4\div 3,1) \cdot 10^5$  с. Для теоретического расчета величины  $t_m$  по формуле  $t_m = a^2 / (K_8 D)$  использовались исходные данные, приведенные в табл. 1.



Р и с . 15. Зависимость относительного сопротивления  $k$  от относительного времени  $t/t_m$  для одноточечного контакта



Т а б л и ц а 1. Числовые данные для расчета времени жизни электрического контакта

Характеристика контакта	Величина
Расчетное значение радиуса контакта $a$	$10 \cdot 10^{-6}$ м
Экспериментальное значение контактной разности потенциалов $\Delta U$	$< 10^{-2}$ В
Экспериментальное значение объемной температуры $T_b$	373 К
Температура поверхности контакта $T$	374 К
Температура плавления $T_{пл}$	1356 К
Гомологическая температура $\Theta = T/T_{пл}$	0,276
Коэффициент $D_0$	$10^{-5}$ м <sup>2</sup> /с
Параметр $B$	7
Коэффициент $K_\delta$	11...21
Относительная толщина пленки $\delta_c/\delta_m$	0,01...0,10

Радиус единичного пятна контакта  $a$  в экспериментах, результаты которых представлены на рис. 15, рассчитывали двумя способами.

1. *Расчет по формуле Герца для упругого контакта.* Для упругого контакта сферического зонда с плоской поверхностью образца радиус контактной площадки может быть рассчитан по формуле [18, 19]:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 NR_3}{4 E'}}, \quad (17)$$

где  $N$  – нагрузка на зонд;  $R_3$  – радиус закругления вершины зонда,  $E'$  – эквивалентный модуль Юнга, который рассчитывается по формуле

$$\frac{1}{E'} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2},$$

где  $E_1, E_2, \mu_1, \mu_2$  – модули Юнга и коэффициенты Пуассона материалов контактирующих деталей соответственно.

В нашем случае нагрузка на зонд  $N = 14$  г (0,14 Н), радиус закругления вершины зонда  $R_3 = 0,5$  мм. Характеристики материалов контактирующих деталей приведены в табл. 2. Подставляя значения в уравнение (17), получим  $a = 10$  мкм.

Т а б л и ц а 2. Числовые данные для расчета радиуса пятна

Характеристика	Медь	Сплав Au80% Cu20%
Модуль Юнга $E$ , $10^{11}$ Па	1,3	0,8
Коэффициент Пуассона $\mu$	0,34	0,4
Удельное сопротивление $\rho$ , $10^{-8}$ Ом·м при 100°C	2,4	11

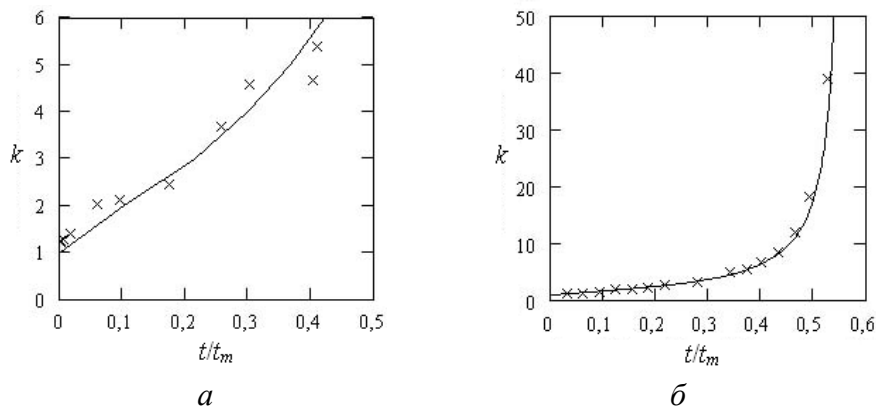
2. *Расчет по значению контактного электросопротивления.* Способ заключается в измерении контактного электрического сопротивления сразу после замыкания контакта и расчете значения радиуса контактного пятна на основании известной формулы Хольма [1]

$$R = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a}.$$

В нашем случае экспериментальные значения сопротивления контакта заключены в диапазоне  $R = 2...6$  мОм, это соответствует значениям радиуса пятна контакта  $a = 6...17$  мкм. Окончательно принимаем в соответствии с расчетом  $a = 10$  мкм.

Теоретический расчет предельного срока службы исследованных контактов дает значения  $t_m = (0,5...1,0) \cdot 10^5$  с. При сравнении теоретических и экспериментальных значений величин предельного срока службы контактов следует иметь в виду, что величина коэффициента диффузии очень чувствительна ко многим факторам, поэтому не может быть рассчитана с высокой точностью. Поэтому полученное совпадение экспериментальных и теоретических значений величины  $t_m$  следует признать вполне удовлетворительным.

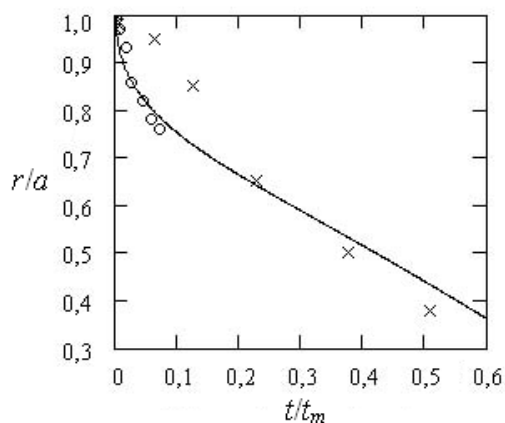
Характер изменения сопротивления во времени, предсказываемый формулами (11) и (12), экспериментально наблюдали многие исследователи [2, 6–8, 20–26] для различных материалов контакт-деталей в различных рабочих средах. На рис. 16а и б приведены сравнения результатов экспериментов авторов [6] и [7] с аналитическими зависимостями по формулам (11) и (12) соответственно. Теоретические кривые получены аппроксимацией экспериментальных данных зависимостями (11), (12) с определением величин параметра  $t_m$ .



Р и с . 16. Зависимость относительного сопротивления  $k$  от относительного времени  $t/t_m$  (а) [6] и (б) [7]: а – равномерное распределение пятен контакта:  $t_m = 9,5 \cdot 10^7$  с; б – бета-распределение пятен контакта:  $t_m = 5,6 \cdot 10^9$  с

Рис. 16 свидетельствуют о том, что экспериментальные данные разных авторов хорошо описываются уравнениями (11) и (12). Более того, обработка экспериментальных данных в соответствии с формулами (11) и (12) позволяет определить предельные сроки службы контактов.

В работах [2, 26] приведены результаты измерения радиусов пятен контакта в зависимости от времени для различных металлов. Нами обработаны экспериментальные результаты, которые получены при практически постоянной температуре контакта. Экспериментальные данные работы [26] аппроксимировались зависимостью (9). В результате аппроксимации определены величины предельного срока службы контактов  $t_m$ , приведенные на рис. 17. Рис. 17 свидетельствует о том, что экспериментальная зависимость радиуса пятна контакта от времени хорошо описывается уравнением (9).



Р и с . 17. Зависимость относительного радиуса  $r/a$  пятна контакта от относительного времени  $t/t_m$  [26]:  $t_m = (0,16 \dots 1,1) \cdot 10^7$  с

### **8. Связь времени жизни контакта с его сопротивлением.**

Необходимо отметить важное с практической точки зрения обстоятельство. Как уже отмечалось, предельное время жизни контакта определяется величиной  $t_m = a^2 / (K_\delta D)$ . Таким образом, для увеличения срока службы контакта выгодно иметь малое число пятен контакта с большим начальным радиусом. Величина радиуса пятна контакта  $a$  определяет также начальное сопротивление контакта: чем больше величина  $a$ , тем меньше начальное сопротивление контакта. Таким образом, время жизни контакта связано с его начальным сопротивлением.

Выразим из формулы Хольма величину  $a$  через начальное сопротивление контакта:  $a = \rho / (2nR_0)$ . Отсюда следует, что предельный срок службы контакта  $t_m \sim 1/R_0^2$ . Таким образом, чем больше начальное сопротивление контакта, тем меньше срок его службы, то есть контакты с большим начальным сопротивлением будут иметь нестабильное во времени сопротивление. Экспериментальные результаты из работы [23] подтверждают этот вывод.

### **Список литературы**

1. Holm, R. Electric contacts. Theory and application / R. Holm. Berlin et. al.: Springer-Verlag, 1967.
2. Takano, E. The failure mode and lifetime of static contacts / E. Takano, K. Mano // IEEE Trans. on Parts, Materials and Packaging. 1968. V. 1. P. 51-55.
3. Брон, О.Б. Прогнозирование поведения замкнутых контактов при длительной эксплуатации в различных средах / О.Б. Брон, Б.Э. Фридман, М.Е. Евсеев [и др.] // Электротехника. 1978. № 2. С. 5-7.
4. Izmailov, V.V. Conductivity of long-term closed electrical contacts / V.V. Izmailov // Proc. 10th Int. Conf. on Electrical Contact Phenomena. Budapest, 1980. P. 93-104.
5. Bryant, M.D. Time-wise increases in contact resistance due to surface roughness and corrosion / M.D. Bryant // IEEE Trans. on Comp., Hybrids and Manufact. Technol. 1991. V. CHMT-14. № 1. P.79-89.
6. Bergmann, R. Model to assess the reliability of electrical joints / R. Bergmann, H. Löbl, H. Böhme, S. Großmann // Electrical Contacts-1996. Chicago, 1996. P. 180-188.
7. Ming, Sun. Lifetime resistance model of bare metal electrical contacts / Sun Ming, M.G. Pecht, M.A.E. Natishan, R.I. Martens // IEEE Trans. Advanced Packaging. 1999. V. 22. № 1. P. 60-67.

8. Boyer, L. Electrical and Physical Modeling of Contact Defects due to Fretting / L. Boyer, F. Houze, G. Klimk, S. Noel // IEEE Trans. on Comp., Hybrids and Manufact. Technol. 1994. V. 17. № 1. P. 134-140.
9. Braunovic, M. A Model for Life Time Evaluation of Closed Electrical Contacts / M. Braunovic, V.V. Izmailov, M.V. Novoselova // Proceedings of the 51 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Chicago, 2005. P. 217-223.
10. Измайлов, В.В. Математическая модель для прогнозирования технического состояния электроконтактных соединений // В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. Контроль. Диагностика. 2012. № 2. С. 38-43.
11. Kubaschewski, O. Oxidation of metals and alloys / O. Kubaschewski, B.E. Hopkins. London: Butterworths. 1962.
12. Бэррер, Р. Диффузия в твердых телах / Р. Бэррер. М.: Изд-во иностр. литературы, 1948. 504 с.
13. Holm, R. Thermionic and tunnel currents in film-covered symmetric contacts / R. Holm // J. Appl. Phys. V. 39. № 7. 1968. P. 3294-3297.
14. Maugis, D. Creep, hot hardness and sintering in the adhesion of metals at high temperature / D. Maugis // Wear. 1980. V. 62. № 2. P. 349-386.
15. Frost, H.J. Deformation - mechanism maps / H.J. Frost, M.F. Ashby. Oxford e.a.: Pergamon Press, 1982. 166 p.
16. Mohan Rao, M. Grain boundary diffusion / M. Mohan Rao, S. Ranganathan // Materials Science Forum. 1984. V. 1. P. 43-58.
17. Каур, И. Диффузия по границам зерен и фаз / И. Каур, В. Густ. М.: Машиностроение, 1991. 448 с.
18. Timoshenko, S.P. Theory of elasticity / S.P. Timoshenko, J.N. Goodier. N.Y. – London et. al.: McGraw-Hill, 1970.
19. Johnson, K.L. Contact mechanics / K.L. Johnson. Cambridge et. al.: Cambridge Univ. Press., 1987.
20. Bohme, H. Alterung von Aluminum-Schraubverbindungen / H. Bohme, H. Lobl // Proc. VIII Kontakt-Tagung der DDR. Karl-Marx-Stadt, 1987. P. 167-177.
21. Grossmann, S. Zum Langzeitverhalten des Widerstandes von Steckverbindungen der Elektroenergie-technik / S. Grossmann, H. Bohme, U. Storr // Proc. VIII Kontakt-Tagung der DDR. Karl-Marx-Stadt, 1987. P. 228-232.
22. Naybour, R.D. Connectors for aluminum cables: a study of the degradation mechanisms and design criteria for reliable connectors / R.D. Naybour, T. Farrell // IEEE Trans. on Parts, Hybrids and Packaging. 1973. V. 9. P. 30-36.
23. Runde, M. Experimental study of the conducting spots in aluminum contact interfaces / M. Runde, E. Hodne, B. Totdal // Electrical Contacts-

1989: Proc. 35th Meet. of IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts. Chicago, 1989. P. 205-211.

24. Silveira, V.L.A.da. On the behavior of tin-plated electrical connectors during heat cycling tests / V.L.A.da Silveira, R.R.G. Teixeira, W.A. Mannheimer // Electrical Contacts-1983: Proc. 29th Meet. of IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts. Chicago, 1983. P. 105-110.

25. Tamai, T. Ellipsometric analysis for growth of Ag<sub>2</sub>S film and effect of oil film on corrosion resistance of Ag contact surface / T. Tamai // Electrical Contacts-1988: Proc. 34th Meet. of IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts. Chicago, 1988. P. 281-287.

26. Timsit, R.S. Electrical instabilities in stationary contacts: Al-plated-brass junctions / R.S. Timsit // IEEE Trans. on Comp., Hybrids and Manufact. Technol. 1988. V. CHMT-11. P. 43-53.

### **DEGRADATION MECHANISM OF CLOSED ELECTRICAL CONNECTION JOINTS AND THEIR LIFETIME ESTIMATION**

**V. V. Izmailov, M. V. Novoselova**

Tver State University of Technology

Theoretical dependence for the increase of contact resistance of electrical connection in time has been obtained on the basis of the diffusion model of degradation processes of single contact spots. Formulae for an assessment of a lifetime of closed electrical connections are offered. The model adequacy is confirmed by experimental data.

**Keywords:** *electrical contact, electrical resistance, contact degradation, lifetime*

**Об авторах:**

ИЗМАЙЛОВ Владимир Васильевич – доктор техн. наук, профессор кафедры прикладной физики ТвГТУ; *email:* [izv2v@tvcom.ru](mailto:izv2v@tvcom.ru);

НОВОСЕЛОВА Марина Вячеславовна – канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной физики ТвГТУ, *email:* [novoselova.tgtu@yandex.ru](mailto:novoselova.tgtu@yandex.ru).