

УДК 621.01:620.17

Герметичность уплотнительных соединений с упругопластическим покрытием

Ю.Н. Алпатов^a, А.С. Кожевников^b

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия

^aijpm@brstu.ru, ^bkozhevnikovart@inbox.ru

Статья поступила 18.10.2015, принята 11.11.2015

Для оценки герметизирующей способности уплотнительного стыка использован безразмерный функционал проницаемости $S_{\text{и}}$, который определяется относительной площадью контакта η , плотностью зазоров в стыке Λ и долей эффективных микроканалов $\nu_{\text{и}}$. На основании жесткостной модели слоистого полупространства представлены его упругие характеристики (приведенный модуль упругости и коэффициент Пуассона) при внедрении сферической неровности в зависимости от упругих характеристик покрытия и основного материала, толщины покрытия и радиуса пятна контакта. Для описания жесткой шероховатой поверхности использована дискретная модель в виде набора одинаковых сферических сегментов. Распределение вершин сегментов по высоте соответствует опорной кривой профиля реальной шероховатой поверхности. Для определения усилия и площади контакта при внедрении единичной неровности использованы известные конечно-элементные решения упругопластической задачи. Получена система трансцендентных уравнений для определения относительной площади контакта η и плотности зазоров в стыке Λ в зависимости от безразмерного силового упруго-геометрического параметра F_q . При этом учтены относительная толщина покрытия γ и характеристики упрочняемого материала покрытия — предел текучести σ_y и экспонента упрочнения. Показано влияние относительной толщины покрытия на функционал проницаемости.

Ключевые слова: тонкослойные пленки; упругопластическое покрытие; слоистое полупространство; шероховатая поверхность; контактные характеристики; относительная площадь контакта; плотность зазоров, герметичность соединений, функционал проницаемости

Tightness of sealing joints with elastic-plastic coating

Yu.N. Alpatov^a, A.S. Kozhevnikov^b

Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia

^aijpm@brstu.ru, ^bkozhevnikovart@inbox.ru

Received 18.10.2015, accepted 11.11.2015

Based on the layered half-space stiffness model, elastic characteristics of the half space have been presented depending on the elastic characteristics (reduced modulus of elasticity and Poisson's ratio) of the coating and basic material, the thickness of a coating and a heel pattern radius. To describe a rigid rough surface, the discrete model in the form of identical spherical segment set has been applied. The segment vertexes distribution through the height corresponds to a supporting curve of a real rough surface profile. To estimate the load and the area of a contact with the penetration of a single asperity, known finite element for solving elastic-plastic problem have been used. System of transcendental equations has been obtained to determine the relative contact area η and the gap density Λ depending on the dimensionless force elastic-geometric parameter F_q . Besides, the coating thickness δ and the hardenable coating material characteristics – the yield strength σ_y and the hardening exponent – have been taken into account. The effect of the relative coating thickness on a gap density value is shown.

Key words: thin-layer films; elastic-plastic coating; layered half-space; rough surface; contact characteristics; relative contact area; gap density.

Введение. Одним из перспективных направлений, обеспечивающих повышение эксплуатационных показателей уплотнений и узлов трения, является нанесение на их рабочие поверхности антифрикционных материалов и покрытий, применяемых без использования традиционных жидких смазочных материалов и пластичных смазок. До недавнего времени объем их применения был ограничен. Потребности возникли в связи с развитием аэрокосмической и криогенной техники,

применением новых, реализуемых в вакууме, технологических процессов. Это дало мощный импульс к созданию и исследованию покрытий, предназначенных для экстремальных условий эксплуатации — вакуум, низкие и повышенные температуры, агрессивная среда, высокие контактные давления [1]. Тела с тонкими покрытиями было предложено называть топокомпозирами [2]. Опыт эксплуатации узлов трения и уплотнений с такими покрытиями показывает, что их уплотнитель-

ная способность и антифрикционные свойства определяются не только свойствами, но и толщиной материала покрытия. Известные рекомендации по выбору толщины покрытия основаны на экспериментальных данных, нередко противоречивых. Отсутствие до недавнего времени теории контактного взаимодействия шероховатых поверхностей через слой покрытия не позволяло разработать надежные методы прогнозирования характеристик трения трибосопряжений и герметичности уплотнений на стадии проектирования, что требовало проведения дорогостоящих и трудоемких испытаний по определению работоспособности узлов трения и уплотнений. Сравнительно недавно появились работы, посвященные определению относительной площади контакта при контактировании жесткой шероховатой поверхности через слой упругого [3–5], вязкоупругого [6] и упругопластического [7–9] покрытия. Плотность зазоров [10; 11] и герметичность [12] определены только при контактировании жесткой шероховатой через слой упругого покрытия.

Цель настоящей работы — определить герметичность соединений с упругопластическим покрытием.

Методика определения герметичности соединений. Для оценки герметизирующей способности уплотнительного стыка в работах [13–16] используется безразмерный функционал проницаемости:

$$C_u = \frac{\Lambda^3 K \nu_n}{4(1-\eta)^2 K_l}, \quad (1)$$

где Λ – плотность зазоров в стыке; η относительная площадь контакта; ν_n – доля эффективных микроканалов; K – коэффициент, учитывающий местные потери (из-за сужения и расширения микроканалов); K_l – коэффициент извилистости. В первом приближении с запасом по герметичности можно принять $K = 1$, $K_l = 1$.

Параметр C_u зависит от параметров микрогеометрии и контактных давлений герметизации.

Интенсивность утечки (массовый или объемный расход на единицу длины по периметру) определяется выражениями:

$$G_f = C_f \cdot C_u, \quad Q_l = C_q \cdot C_u, \quad (2)$$

где:

$$G_f = \frac{R_{\max}^3 \rho \Delta p}{2l\mu}, \quad G_q = \frac{R_{\max}^3 (p_1^2 - p_2^2)^2}{4l\mu}; \quad (3)$$

R_{\max} – максимальная высота микронеровностей; l – ширина зоны уплотнения; ρ, p, μ – плотность, давление и вязкость уплотняемой среды.

Поэтому при проектировании уплотнительного соединения удобно, исходя из заданных ρ, p_1, p_2, μ и назначенных R_{\max} , с учетом G_f (или Q_l) из выражений (2) и (3), определить требуемый коэффициент про-

ницаемости, например G_f , а затем из зависимости $C_f(q_n)$ определить контакты давления q_n , обеспечивающего заданный C_u^* , а, следовательно, и заданную интенсивность утечки.

Выражение (3) для C_g получено для модели идеального газа и вязкостного режима истечения среды. Для модели реального газа следует использовать данные работы [16].

Как следует из выражения (1), основными параметрами, влияющими на функционал проницаемости, являются плотность зазоров в стыке Λ , относительная площадь контакта η и доля эффективных микроканалов ν_n , по которым происходит утечка среды.

Доля эффективных микроканалов [15]:

$$\nu_n = \begin{cases} (1-x^*), & x^* \geq \frac{1}{3}; \\ 3^{n-1}(1-x^*)^n, & x^* < \frac{1}{3}; \end{cases} \quad (4)$$

где n – число рядов микронеровностей по ширине зоны уплотнения;

$$x^*(n, \varepsilon) = \int_0^\varepsilon x_i^*(n, \varepsilon, u) \phi'(u) du;$$

$\phi'(u)$ – плотность функции распределения неровностей по высоте;

$$x_i^*(n, \varepsilon, u) = \begin{cases} 0, & \eta_i(n, \varepsilon, u) < \eta_i^*; \\ 1, & \eta_i(n, \varepsilon, u) \geq \eta_i^*; \end{cases}$$

$\eta_i^* = 0,5...0,55$ – критическое значение η_i .

Жесткостная модель слоистого тела. Рассмотрим вначале контактную систему с однослойным покрытием толщиной δ_1 (рис. 1). Используя жесткостную модель слоистого полупространства, авторы [17; 18] определили его упругую характеристику в зависимости от толщины покрытия и упругих констант материалов основания и покрытия. При этом рассматривались два варианта: нагружение полупространства нормальной нагрузкой вида:

$$p(r) = p_0 \sqrt{1-r^2/a^2}, \quad 0 \leq r \leq a \quad (5)$$

и внедрение в слоистое полупространство жесткой сферы. Различия между значениями упругой характеристики, полученной при разных нагружениях, не превышали 0,2%. Поэтому достаточно ограничиться одним видом нагружения.

В дальнейшем в работах [19; 20] было рассмотрено нагружение слоистого тела нагрузкой;

$$p(r) = p_0 (1-r^2/a^2)^\beta, \quad (6)$$

где $0 \leq \beta \leq 0,5$, $p_0 = p_m(1+\beta)$, $p_m = P/(\pi a^2)$ — среднее давление.

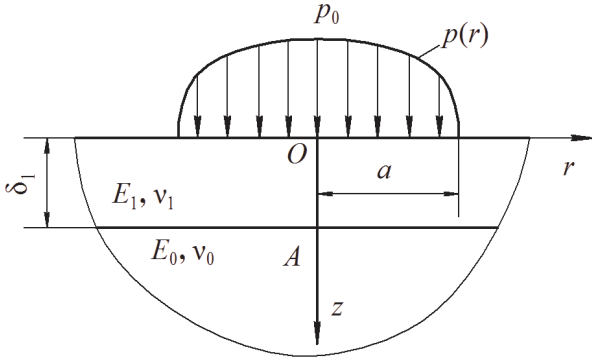


Рис. 1. Схема нагружения слоистого тела

На основании жесткостной модели слоистого тела определен модуль упругости топокомпозиита:

$$E_{01}^* = E_1^* F_1, \quad (7)$$

$$F_1 = K_1(0) \left[\frac{(K_1(0) - K_1(\bar{\delta}))^2}{K_{01}(0) - K_{01}(\bar{\delta})} + K_1(\bar{\delta}) \frac{K_0(\bar{\delta}) E_1^*}{K_{01}(\bar{\delta}) E_0^*} \right]^{-1}; \quad (8)$$

и коэффициент Пуассона:

$$\nu_{01} = \nu_1 + (\nu_0 - \nu_1) \frac{1 - F_1^{-1}}{1 - E_1^*/E_0^*}. \quad (9)$$

Для случая контакта гладкой жесткой сферы со слоистым полупространством сближение тел определяется выражением:

$$w_{01} = w_1 F_1^{2/3}. \quad (10)$$

Для радиуса контакта и максимального давления имеем:

$$a_{01} = a_1 F_1^{1/3}, \quad p_{01} = p_0 F_1^{-2/3}. \quad (11)$$

Моделирование контактного взаимодействия. Воспользуемся дискретной моделью шероховатости, в которой микронеровности представлены в виде одинаковых сферических сегментов, распределение которых по высоте соответствует опорной кривой профиля реальной поверхности [21–23]. Для описания опорной кривой используем распределение неполной бета-функции:

$$\eta(\varepsilon) = \frac{B_\varepsilon(\alpha, \beta)}{B(\alpha, \beta)}, \quad (12)$$

где $B_\varepsilon(\alpha, \beta)$, $B(\alpha, \beta)$ — соответственно неполная и полная бета-функции;

$$\alpha = \left(\frac{R_p}{R_q} \right)^2 \left(\frac{R_{\max} - R_p}{R_{\max}} \right) - \frac{R_p}{R_{\max}}, \quad \beta = \alpha \left(\frac{R_{\max}}{R_p} - 1 \right); \quad (13)$$

R_p , R_q , R_{\max} — высотные параметры шероховатости согласно стандарту ISO 4281/1–1997.

В этом случае плотность функции распределения неровностей по высоте:

$$\varphi'_n(u) = \frac{u^{\alpha-2}(1-u)^{\beta-2}[(\alpha-1)(1-u) - (\beta-1)u]}{\varepsilon_s^{\alpha-1}(1-\varepsilon_s)^{\beta-1}}. \quad (14)$$

где ε_s определяется из условия $\varphi_n(\varepsilon_s) = 1$; ωR_{\max} — высота сферического сегмента, $\omega = 1 - \varepsilon_s$, $\omega = 0, 2 \dots 0,6$; a_c — радиус основания; радиус сферического сегмента:

$$R = \frac{a_c^2}{2\omega R_{\max}}. \quad (15)$$

Выражение (15) получено при условии, что $R \gg R_{\max}$.

При упругом контакте зависимость между относительной величиной внедрения i -ой неровности h/R и относительным усилием описывается выражением [24]:

$$\frac{P_{ei}}{E^* R^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h_i}{R} \right)^2, \quad (16)$$

где E^* — приведенный модуль упругости.

Для упругопластического контакта в работе [24] использована методика определения h/R на основе подобия деформационных характеристик, однако ее применения для распределенных по высоте сферических сегментов затруднительно, так как зависимость $P-h$ в явном виде не описывается. Поэтому используем выражение из работы [25], расчеты по которому с погрешностью менее 5 % согласуются с результатами [24] для $0 \leq h/R \leq 0,15$. Согласно [25]:

$$\frac{P_{epi}}{E_{01}^* R^2} = e^{-B \left(\frac{h_i}{R} \right)^A}, \quad (17)$$

где $A = A(\varepsilon_y, n)$, $B = B(\varepsilon_y, n)$ — коэффициенты;

$$\varepsilon_y = \sigma_y / E_{01}^*.$$

При использовании выражений (16) и (17) для неровностей шероховатой поверхности следует учитывать, что:

$$h_i = (\varepsilon - u) R_{\max}, \quad (18)$$

$$\frac{h_i}{R} = \frac{(\varepsilon - u) \cdot 2\omega R_{\max}^2}{a_c^2} = \left(\frac{\varepsilon - u}{2\omega} \right) \cdot \left(\frac{2\omega R_{\max}}{a_c} \right)^2, \quad (19)$$

где ε — относительное сближение шероховатой поверхности и полупространства; u — исходное расстояние до вершины i -ой неровности.

Параметр $\bar{\delta}_1$ для отдельной неровности можно представить в виде:

$$\bar{\delta}_1 = \frac{\delta_1}{a_r} = \frac{\delta_1}{a_c} \cdot \frac{a_c}{a_r} = \gamma \cdot \eta_i^{-0.5}, \quad (20)$$

где $\gamma = \delta_1 / a_c$ — относительная толщина покрытия; $\eta_i = A_{ri} / A_{ci} = a_r^2 / a_c^2$ — относительная площадь контакта для отдельной неровности.

При определении A_{ri} учитываем, что:

$$h_{ci} = c_i^2 \cdot h_i. \quad (21)$$

Для упругого контакта $c_i^2 = 0,5$, для упругопластического — используем данные работы [26]:

$$c_i^2 = \frac{h_{ci}}{h_i} = M \frac{2}{N} \left(2 \frac{h}{R} \right)^{\frac{2}{N}-1}, \quad (22)$$

где $M = M(\varepsilon_y, n)$, $N = N(\varepsilon_y, n)$ — коэффициенты.

С учетом выражений (15), (19) и того, что:

$$\eta_i = \frac{2\pi R h_{ci}}{\pi a_c^2}, \quad (23)$$

получим:

$$\eta_i^{-0,5} = (2M)^{-\frac{1}{N}} \left(\frac{2\omega R_{\max}}{a_c} \right)^{1-\frac{2}{N}} \left(\frac{\varepsilon-u}{2\omega} \right)^{\frac{1}{N}}. \quad (24)$$

Таким образом, для каждой контактирующей неровности согласно выражению (7) имеем:

$$E_{01}^*(\gamma, \varepsilon, u) = E_1^* F_1^*(\gamma, \varepsilon, u), \quad (25)$$

где $F_1^*(\gamma, \varepsilon, u)$ определяется с учетом выражений (7), (8) и (9).

Тогда выражение (16) и (17) представим в виде:

$$\frac{P_{ei}(\gamma, \varepsilon, u)}{E^* R^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h_i(\varepsilon, u)}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot F_1^*(\gamma, \varepsilon, u), \quad (26)$$

$$\frac{P_{epi}(\gamma, \varepsilon, u)}{E^* R^2} = e^{-B} \left(\frac{h_i(\varepsilon, u)}{R} \right)^A \cdot F_1^*(\gamma, \varepsilon, u). \quad (27)$$

При внедрении жесткой шероховатой поверхности на величину ε общее усилие P определяется выражением:

$$P = \int_{\varepsilon-\varepsilon_e}^{\varepsilon} P_{ei} dn_r + \int_0^{\varepsilon-\varepsilon_e} P_{epi} dn_r, \quad (28)$$

где ε_e — относительная граница упругого контакта; dn_r — число вершин в слое du ,

$$dn_r = n_c \varphi'_n(u) du, \quad n_c = \frac{A_c}{\pi a_c^2}. \quad (29)$$

$\varphi'_n(u)$ — плотность функции распределения неровностей по высоте (14).

Используя данные [23–25], имеем:

$$\varepsilon_e = \varepsilon_e(\varepsilon_y) = \frac{\pi^2 K_{\sigma}^2 \varepsilon_y^2 a_c^2}{8\omega R_{\max}^2}, \quad (30)$$

где $K_{\sigma} = 1,613$ — коэффициент, учитывающий начало пластической деформации внутри полупространства под вершиной неровности.

Подставляя выражение (29) в (28), имеем:

$$\frac{P}{A_c} = q_c = \int_{\varepsilon-\varepsilon_e}^{\varepsilon} q_{cei} \cdot \varphi'_n(u) du + \int_0^{\varepsilon-\varepsilon_e} q_{cepi} \cdot \varphi'_n(u) du, \quad (31)$$

$$\text{где } q_{cei} = \frac{P_{ei}}{\pi a_c^2}, \quad q_{cepi} = \frac{P_{epi}}{\pi a_c^2}.$$

Обозначая:

$$\frac{q_c a_c}{\omega R_{\max} E_1^*} = F_{q1}, \quad (32)$$

с учетом (19), (26), (27) окончательно получим:

$$F_q(\gamma, \varepsilon, \varepsilon_e) = \frac{8}{3\pi} \int_{\varepsilon-\varepsilon_e}^{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon-u}{2\omega} \right)^{\frac{3}{2}} F_1^*(\gamma, \varepsilon, u) \varphi'_n(u) du + \frac{2^{2(A-1)} e^{-B}}{\pi} \left(\frac{\omega R_{\max}}{a_c} \right)^{2A-3} \times \int_0^{\varepsilon-\varepsilon_e} \left(\frac{\varepsilon-u}{2\omega} \right)^A F_1^*(\gamma, \varepsilon, u) \varphi'_n(u) du. \quad (33)$$

Для фактической площади контакта аналогично выражению (29) имеем:

$$A_r = \int_{\varepsilon-\varepsilon_e}^{\varepsilon} A_{rei} dn_r + \int_0^{\varepsilon-\varepsilon_e} A_{repi} dn_r. \quad (34)$$

Для относительной площади контакта $\eta = A_r/A_c$ окончательно получим:

$$\eta(\varepsilon, \varepsilon_e) = \frac{8}{3\pi} \int_{\varepsilon-\varepsilon_e}^{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon-u}{2\omega} \right) \varphi'_n(u) du + (2M)^{\frac{2}{N}} \left(\frac{2\omega R_{\max}}{a_c} \right)^{2\left(\frac{2}{N}-1\right)} \times \int_0^{\varepsilon-\varepsilon_e} \left(\frac{\varepsilon-u}{2\omega} \right)^{\frac{2}{N}} \varphi'_n(u) du. \quad (35)$$

Плотность зазоров в стыке [23]:

$$\Lambda = \frac{V_3}{A_c R_{\max}} = 1 - K_p - \varepsilon + \Lambda_e - \Lambda_p, \quad (36)$$

$$\text{где } K_p = \int_0^1 \eta(\varepsilon) d\varepsilon,$$

$$\Lambda_e = V_e / (A_c R_{\max}), \quad \Lambda_p = V_p / (A_c R_{\max}). \quad (37)$$

Общий объем за счет упругого продавливания всех неровностей, деформирующихся упруго и упругопластически:

$$V_e(\varepsilon) = \int_{\varepsilon-\varepsilon_e}^{\varepsilon} V_{ei}(\varepsilon, u) n_c \varphi'_n(u) du + \int_0^{\varepsilon-\varepsilon_e} V_{epi}(\varepsilon, u) n_c \varphi'_n(u) du, \quad (38)$$

где:

$$V_{ei} = \frac{8}{3\pi} R^3 \left(\frac{h}{R} \right)^2 K_{\beta_e} (F_e(z_{1e}) - F_e(1)); \quad (39)$$

$$V_{epi} = \frac{2}{\pi} R^3 e^{-B} (2M)^{\frac{1}{N}} \left(\frac{h}{R}\right)^{A+\frac{1}{N}} K_{\beta_e} (F_e(z_{lep}) - F_e(1)), \quad (40)$$

$$F_e(z) = z^{-\frac{1}{2}} {}_2F_1\left(-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; \beta_e + 1; z\right), \quad (41)$$

$$z_{1e} = \frac{\varepsilon - u}{2\omega}, \quad (42)$$

$$z_{lep} = M^{\frac{2}{N}} \left(\frac{2\omega R_{max}}{a_c}\right)^{2\left(\frac{2}{N}-1\right)} \left(\frac{\varepsilon - u}{\omega}\right)^{\frac{2}{N}}. \quad (3)$$

Суммарный объем пластически вытесненного материала:

$$V_p = \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_e} V_{pi} n_c \varphi'_n(u) du, \quad (44)$$

где:

$$V_{pi} = \pi R^3 \bar{h}_{fi} \left(\bar{\rho}_i - \frac{\bar{h}_{fi}}{3}\right), \quad (45)$$

$$\bar{h}_{fi} = \frac{h_{fi}}{R} = \frac{e^{-B}}{2\pi K_h \varepsilon_y} \left(\frac{h_i}{R}\right)^A, \quad (46)$$

где $K_h = K_h(\varepsilon_y, n)$ определяется согласно [31].

Если радиус единичной неровности $R \gg h_{ci}$, то радиус остаточной лунки (кратера) после снятия нагрузки:

$$\rho_i = R \frac{h_{ci}}{h_{ci} - w_0 + w_c}, \quad (47)$$

где w_0 и w_c — упругие перемещения при восстановлении в центре и по контуру лунки.

По данным [30]:

$$w_0 - w_c = \frac{P_m \cdot a_r}{E} \cdot K_{\beta_{cr}}, \quad (48)$$

где:

$$K_{\beta_{cr}} = 2^{2\beta_e+1} (1+\beta) \cdot B(\beta+1, \beta+1) \cdot \left(1 - \frac{1}{\pi} B\left(\frac{1}{2}, \beta+1\right)\right).$$

С учетом выражений (17) и (22):

$$\frac{h_c}{R} = c^2 \frac{h}{R} = M^{\frac{2}{N}} 2^{\frac{2-N}{N}} \left(\frac{h}{R}\right)^{\frac{2}{N}}, \quad (49)$$

$$\frac{w_0 - w_c}{R} = \frac{e^{-B} K_{\beta_{cr}}}{\pi (2M)^{\frac{1}{N}}} \left(\frac{h}{R}\right)^{A-\frac{1}{N}}. \quad (50)$$

Подставляя выражения (49) и (50) в (47), определяем $\bar{\rho}_i = \bar{\rho}_i/R$. Затем, подставляя выражения (46) и (47) в (45), рассчитываем величину V_p по выражению (44). Далее, используя выражение (44), (38) и (37), определяем плотность зазоров в уплотнительном стыке Λ .

Следует отметить, что при определении коэффициентов A, B и M, N , входящих в выражения (33), (35), (40), (43), (49) и (50):

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y(\gamma, \varepsilon, u) = \frac{\sigma_y}{E_1^* F_1^*(\gamma, \varepsilon, u)}. \quad (51)$$

Таким образом, получена замкнутая система трансцендентных уравнений, позволяющая определить относительную площадь контакта η и плотность зазоров в стыке Λ_c и в конечном итоге – функционал проницаемости C_u упругогеометрического параметра при контактировании жесткой шероховатой поверхности через упругопластическое покрытие.

Обсуждение полученных результатов. Решение системы трансцендентных уравнений для контактирования жесткой шероховатой поверхности со слоистым телом, состоящим из упругого основного материала и упругопластического покрытия, производилось в среде Mathcad. Константы упругости основного материала и покрытия соответственно равны $E_0 = 200$ МПа; $\nu_0 = 0,3$; $E_1 = 80$ МПа; $\nu_1 = 0,3$. Результаты вычислений представлены (рис. 2) в виде зависимостей плотности зазоров Λ_c от безразмерного силового упругогеометрического параметра F_{q1} при различных значениях относительной толщины покрытия γ . В приведенных результатах расчетов параметры микрогеометрии $R_{max} = 4$ мкм и $a_c = 5$ мкм выбирались таким образом, чтобы для заданного диапазона F_{q1} обеспечивался упругопластический контакт для единичной неровности. Так как вопрос об определении границы применимости γ_{min} используемой жесткостной модели слоистого тела с упругопластическим покрытием исследован недостаточно, в расчетах минимальное значение γ_{min} принималось равным 1.

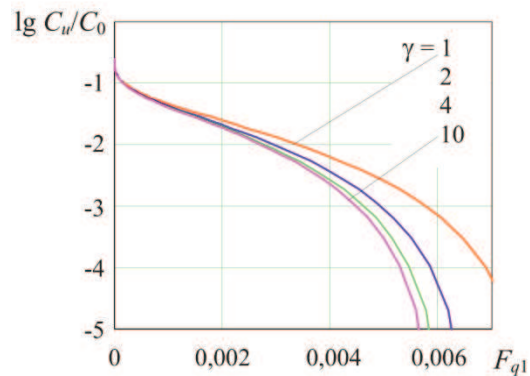


Рис. 2. Зависимость $\Lambda_c(F_{q1})$ при разных значениях относительной толщины покрытия γ

С увеличением относительной толщины покрытия γ плотность зазоров в стыке Λ_c уменьшается (рис. 2). Это можно объяснить увеличением составляющей Λ_p в выражении (32). С увеличением значения γ относительная площадь контакта стремится к значению для однородного материала. В приведенном случае для

$\gamma = 10$ $F_1 = 1,055$, т. е. приведенный модуль упругости всего на 5,5 % больше модуля упругости материала покрытия.

Заключение

1. С использованием жесткостной модели слоистого тела получена система трансцендентных уравнений для определения плотности зазоров в стыке Λ_c при контактировании жесткой шероховатой поверхности через слой упругопластического покрытия.

2. При упругопластическом контакте с увеличением относительной толщины покрытия плотность зазоров Λ_c уменьшается за счет пластического выдавливания материала покрытия. Очевидно, что в рамках используемой дискретной модели шероховатости возможно такое сочетание параметров ϵ , $\Lambda_e(\epsilon)$ и $\Lambda_p(\epsilon)$, при котором $\Lambda_c = 0$, т. е. дальнейшего уменьшения плотности зазоров происходить не будет.

3. Требуется дополнительных исследований вопрос о границе применимости используемой жесткостной модели слоистого тела, связанный с определением влияния толщины покрытия на начало пластической деформации основного материала.

Исследования проведены при поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания № 2014/10 на 2015 г. (проект № 1754).

Литература

- Ковалев Е.П., Игнатъев М.Б., Семенов А.П., Смирнов Н.И., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Твердосмазочные покрытия для машин и механизмов, работающих в экстремальных условиях (обзор) // Трение и износ. Т. 25. № 3. С. 316-336.
- Воронин Н.А. Топокомпози́ты – новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения // Трение и износ. 1999. Т. 20. № 3. С. 313-320.
- Огар П.М., Максимова О.В., Тарасов В.А. Относительная площадь контакта при взаимодействии шероховатой поверхности с упругим слоистым полупространством // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2008. № 3 (19). С. 49-51.
- Огар П.М., Максимова О.В., Тарасов В.А. Влияние толщины покрытия на относительную площадь контакта сопряженных деталей машин // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 2. С. 13-15.
- Ogar P.M., Tarasov V.A., Gorokhov D.B. The influence of coating thickness on the relative area of tribounits contact // Advanced Materials Research. 2015. Vol. 1061-1062. С. 614-618.
- Огар П.М., Беляева О.В., Алпатов Ю.Н. Контактное взаимодействие жесткой шероховатой поверхности с упругим полупространством через слой вязкоупругого покрытия // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 2 (10). С. 10-14.
- Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Контактное взаимодействие жесткой шероховатой поверхности через слой упругопластического покрытия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 42-45.
- Тарасов В.А., Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Моделирование контакта жесткой шероховатой поверхности через слой покрытия // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. № 2. С. 47-55.
- Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Влияние толщины упругопластического покрытия на относительную площадь контакта // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 4. С. 14-17.
- Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Плотность зазоров при контактировании жесткой шероховатой поверхности со слоистым упругим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2015. № 1 (25). С. 60-65.
- Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Контакт жесткой шероховатой поверхности через слой упругого покрытия / Актуальные вопросы современной техники и технологии: сб. докладов XX-й Международной научной конференции. Липецк: НП «Аргумент», 2015. С. 33-40.
- Горохов Д.Б., Кожевников А.С. Герметичность уплотнительных соединений с тонкослойными упругими покрытиями // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 3. С. 34-40.
- Огар П.М., Корсак И.И. Влияние характеристик тяжело нагруженного стыка шероховатых уплотнительных поверхностей на герметичность. Братск: БРИИ, 1989. 110 с. Деп. в ВИНТИ 05.12.1990. № 6109-В90.
- Долотов А.М., Огар П.М., Чегодаев Д.Е. Основы теории и проектирование уплотнений пневмогидроарматуры летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2000. 296 с.
- Огар П.М., Горохов Д.Б., Ключев Е.А. Герметизирующая способность стыка фрактальных шероховатых поверхностей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 14. С. 63-65.
- Огар П.М., Тарасов В.А., Межецкий В.И. Расчет герметичности затворов трубопроводной арматуры и сосудов высокого давления // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 9. С. 45-50.
- Огар П.М., Максимова О.В., Автушко А.Н., Устюжанин Е.В. К расчету напряженно-деформированного состояния слоистого упругого тела // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2006. № 2. С. 297-302.
- Огар П.М., Ключев Е.А., Максимова О.В. Инженерная методика определения упругих характеристик топокомпози́тов // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 1. С. 19-22.
- Огар П.М., Тарасов В.А., Федоров И.Б. Управление жесткостью контактных систем уплотнительных соединений // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 1. С. 22-27.
- Алпатов Ю.Н., Тарасов В.А., Горохов Д.Б., Кожевников А.С. К вопросу определения контактных характеристик в трибосопряжениях на основе топокомпози́тов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2014. № 2. С. 39-47.
- Огар П.М., Шеремета Р.Н., Лханаг Д. Герметичность металлополимерных стыков шероховатых поверхностей. Братск: Изд-во БрГУ, 2006. 159 с.
- Огар П.М., Тарасов В.А., Корсак И.И. Оптимальное проектирование затворов трубопроводной арматуры. Братск: Изд-во БрГУ, 2012. 145 с.
- Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Контакт жесткой шероховатой поверхности с упругопластическим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 1. С. 17-22.
- Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Геометрия контакта при упругопластическом внедрении сферической неровности // Системы. Методы. Технологии. 2012. № 1. С. 9-16.
- Collin J.-M., Mauvoisin G., Pilvin P. Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches // Materials and Desing. 2010. v. 31. p. 636-640.
- Hernot X., Bartier O., Bekouche Y., El Abdi R., Mauvoisin G. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation // International Journal of Solids and Structures. 2006. № 43. P. 4136-4153.
- Огар П.М., Дейнеко А.А., Щур Д.Д. Контакт жесткой сферической неровности с упругопластическим полупространством // Системы. Методы. Технологии. 2009. № 4. С. 17-19.
- Огар П.М., Тарасов В.А., Дайнеко А.А. О некоторых общих закономерностях упругопластического внедрения сфериче-

ского индентора // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 8. С. 38-43.

29. Огар П.М., Тарасов В.А., Дайнеко А.А. К вопросу упругопластического внедрения сферического индентора // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 10. С. 14-16.

30. Огар П.М., Тарасов В.А. Влияние формы осесимметричной нагрузки на напряженно-деформированное состояние упругопластического полупространства // Системы. Методы. Технологии. 2010. № 5. С. 14-20.

31. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Влияние характеристик упрочняемого материала на упругопластическое внедрение сферической неровности // Системы. Методы. Технологии. 2011. № 12. С. 29-34.

References

1. Kovalev Ye.P., Ignat'yev M.B., Semenov A.P., Smirnov N.I., Nevolin V.N., Fominskiy V.YU. Solid lubricating coating for machines and mechanisms, working under extreme conditions (review) // Treniye i iznos. T. 25. № 3. pp. 316-336.

2. Voronin N.A. Topocomposites are a new class of structural materials tribological // Treniye i iznos. 1999. T. 20. № 3. pp. 313-320.

3. Ogar P.M., Maksimova O.V., Tarasov V.A. The relative area of contact when interacting with the rough surface of a layered elastic half-space // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye. 2008. № 3. P. 49-51.

4. Ogar P.M., Maksimova O.V., Tarasov V.A. The influence of the coating thickness on the relative area of contact conjugations of machine parts // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2009. № 2. P. 13-15.

5. Ogar P.M., Tarasov V.A., Gorokhov D.B. The influence of coating thickness on the relative area of tribounits contact // Advanced Research Materials. 2015. Vol. 1061-1062. C. 614-618.

6. Ogar P.M., Belyaeva O.V., Alpatov Yu.N. Contact interaction of rigid rough surface with elastic half-space through viscoelastic coating layer // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2011. № 2 (10). S. 10-14.

7. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Rough rigid surface contacting through the elastoplastic coating layer // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye. 2012. № 3. S. 42-45.

8. Tarasov V.A., Gorokhov D.B., Kozhevnikov A.S. Simulation contact of rigid roughened surface through the coating layer // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2014. T. 2. P. 47-55.

9. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Effect of elastoplastic coating thickness on the relative contact area // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2012. № 4. S. 14-17.

10. Gorokhov D.B., Kozhevnikov A.S. Gap clearance density upon the contact of a rigid rough surface with a layered elastic half-space // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2015. № 1 (25). S. 60-65.

11. Gorokhov D.B., Kozhevnikov A.S. A contact of a rigid rough surface through a layer of the elastic coating / Aktual'nyye voprosy sovremennoy tekhniki i tekhnologii: sb. dokladov XX-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Lipetsk: NP «Argument», 2015. S. 33-40.

12. Gorokhov D.B., Kozhevnikov A.S. A sealing ability of fixed seal joints with a thin-layer coating // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye. 2015. № 3. S. 34-40.

13. Ogar P.M., Korsak I.I. Influence of characteristics of heavy duty rough joint of sealing surfaces for leaks. Bratsk: BrII, 1989. 110 p. Dep. v VINITI 05.12.1990, № 6109-V90.

14. Dolotov A.M., Ogar P.M., Chegodaev D.E. The foundation of theory and practice sealing joints of aircraft pneumohydroarmature. M.: Izd-vo MAI, 2000. 296 p.

15. Ogar P.M., Gorokhov D.B., Klyuchev E.A. Sealing ability of the fractal rough surfaces joint // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye. 2007. № 14. С. 63-65.

16. Ogar P.M., Tarasov V.A., Mezhetzky V.I. Tightness calculation for the pipeline valves and pressure vessels // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2011. № 9. С. 45-50.

17. Ogar P.M., Maksimova O.V., Avtushko A.N., Ustyuzhanin E.V. The calculation of the stress-strain state of a layered elastic body // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki –razvitiyu regionov Sibiri. 2006. № 2. S. 297-302.

18. Ogar P.M., Kljuchev E.A., Maksimova O.V. Engineering method for determining the elastic characteristics topocompositions // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2009. № 1. p.19-22.

19. Ogar P.M., Tarasov V.A., Fedorov I.B. Management of rigidity of contact systems of sealing compounds // Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovaniye. 2013. № 1. P. 22-27.

20. Alpatov Yu.N., Tarasov V.A., Gorokhov D.B., Kozhevnikov A.S. On the determination of the contact characteristics of the friction units based on topocomposites // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2014. T. 2. P. 39-47.

21. Ogar P.M., Sheremeta R.N., Lhanag D. The tightness of metal-polymeric joints of roughness surfaces. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2006. 159 p.

22. Ogar P.M., Tarasov V.A., Korsak I.I. Optimal design of gate valves. Bratsk BrSU, 2012. 145p.

23. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Contact of a rigid rough surface with elastic-plastic half space // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2012. № 1 (13). P. 17-22.

24. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Contact geometry in the process of elastic-plastic indentation of a spherical asperity // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2012. № 1 (13). S. 9-16.

25. Collin J.-M., Mauvoisin G., Pilvin P. Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches // Materials and Desing. 2010. v. 31. p. 636-640.

26. Hernot X., Bartier O., Bekouche Y., El Abdi R., Mauvoisin G. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation // International Journal of Solids and Structures. 2006. № 43. P. 4136-4153.

27. Ogar P.M., Daineko A.A., Shchur D.D. Contact of a rigid spherical asperity and elastoplastic half-space // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2009. № 4. S. 17-19.

28. Ogar P.M., Tarasov V.A., Daineko A.A. On some general regularities of a spherical indenter elastoplastic indentation // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2010. № 8. S. 38-43.

29. Ogar P.M., Tarasov V.A., Daineko A.A. On the issue of the elastic-plastic introduction of a spherical indenter // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2011. № 10. S. 14-16.

30. Ogar P.M., Tarasov V.A. Effect of the axisymmetrical load shape on the loaded-strained state of elastoplastic half-space // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2010. № 1 (5). S. 14-20.

31. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Effect of the hardenable material characteristics on a spherical asperity elastoplastic indentation // Sistemy. Metody. Tekhnologii. 2011. № 11. S. 29-34.