

УДК 621.01:621.81

Влияние толщины упругопластического покрытия на относительную площадь контакта

П.М. Огар¹, В.А. Тарасов¹, А.В. Турченко¹

¹Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: ogar@brstu.ru
Статья поступила 15.07.2012, принята 16.11.2012

Рассмотрен контакт жесткой шероховатой поверхности со слоистым полупространством, состоящим из упругого основания и упругопластического покрытия. Определена упругая характеристика слоистого тела при нагружении его осесимметричной нагрузкой вида $p(r) = p_0(1 - r^2/a^2)^\beta$, где $0 \leq \beta \leq 0,5$. Для описания контактного взаимодействия использована дискретная модель шероховатости в виде набора одинаковых сферических сегментов. Относительная площадь контакта определена в зависимости от безразмерного силового упругогеометрического параметра F_q . Показано влияние толщины покрытия и характеристик упрочняемого материала: предела текучести σ_y и экспоненты упрочнения n .

Ключевые слова: шероховатая поверхность, упругопластический контакт, экспонента упрочнения, сферическая неровность, тонкослойное покрытие, слоистое полупространство, относительная площадь контакта.

Effect of elastoplastic coating thickness on the relative contact area

P.M. Ogar¹, V.A. Tarasov¹, A.V. Turchenko¹

¹Bratsk State University, 40, Makarenko str., Bratsk, Russia. E-mail: ogar@brstu.ru
The article received 15.07.12, accepted 16.11.12

The contact of a rigid rough surface with layered half-space, which consists of elastic substrate and elastoplastic coating, has been considered. The layered body elastic characteristic at its loading with the axisymmetric load of the type $p(r) = p_0(1 - r^2/a^2)^\beta$, where $0 \leq \beta \leq 0,5$, has been determined. To describe the contact interaction, the roughness discrete model in the form of identical spherical segments set has been used. The relative contact area η has been determined depending on the dimensionless power elastogeometric parameter F_q . It has been shown the effect of coating thickness and the hardenable material characteristics: the yield stress σ_y and hardening exponent n .

Keywords: rough surface, elastoplastic contact, hardening exponent, spherical asperity, thin-layer coating, layered half-space, relative contact area.

Введение. Использование тонкослойных покрытий в узлах трения и уплотнениях представляет значительный интерес, так как эксплуатационные свойства при этом определяются не только характеристиками материалов, но и толщиной покрытия.

Для упругого контакта задача определения относительной площади контакта через слой покрытия решена [1, 2]. Однако, как указано в работе [3], в большинстве случаев при контактировании металлических шероховатых поверхностей контакт является упругопластическим. В ряде недавних работ авторами решены вопросы, связанные с внедрением жесткой сферы в упругопластическое полупространство; результаты приведены в [4, 5]. Это составило теоретическую основу для определения относительной площади контакта и плотности зазоров в стыке при внедрении жесткой шероховатой поверхности в упругопластическое полупространство. В дальнейшем [6] была получена система трансцендентных уравнений, позволяющая определить относительную площадь контакта при взаимодействии

жесткой шероховатой поверхности с упругопластическим покрытием. При определении упругой характеристики слоистого тела использовался случай его нагружения осесимметричной нагрузкой вида

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

что обоснованно для упругого контакта.

Для упругопластического контакта распределение контактного давления при внедрении жесткой сферы описывается выражением [4, 5]:

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

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

Поэтому в методологическом аспекте в работе [6] имеются неточности, которые мы устраним в настоящей работе.

Математическая модель слоистого тела. Следуя классическому подходу, основанному на использовании потенциальных функций Буссинеска, перемещение любой точки по оси симметрии внутрь однородного полупространства при нагрузке вида (2) определяется выражениями [7]:

$$u_z = \frac{1+\nu}{2\pi E} \left[2(1-\nu)\Psi - z \frac{d\Psi}{dz} \right], \quad (3)$$

$$\Psi = \iint_s p(r) \frac{1}{R} r dr d\phi, \quad R = \sqrt{r^2 + z^2}.$$

С учетом выражения (2) и того, что $\rho = r/a$ и $\bar{z} = z/a$,

$$\Psi = 4p_0 a \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^1 \frac{(1-\rho^2)^\beta \rho d\rho d\phi}{\sqrt{\rho^2 + \bar{z}}}. \quad (4)$$

После интегрирования имеем

$$\Psi = \frac{\pi p_0 a}{1+\beta} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+\bar{z}^2}} \cdot {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, 1+\beta; 2+\beta; \frac{1}{1+\bar{z}^2}\right), \quad (5)$$

где ${}_2F_1(a, b; c; x)$ – гипергеометрическая функция Гаусса.

Подставляя выражение (5) в (3) и учитывая, что $\frac{d\Psi}{dz} = \frac{d\Psi}{a d\bar{z}}$, получим

$$\nu_0 u_z = \frac{p_m a}{E^*} K(\bar{z}, \beta, \nu), \quad (6)$$

где $E^* = \frac{E}{1-\nu^2}$, $p_m = \frac{p_0}{1+\beta}$;

$$K(\bar{z}, \beta, \nu) = \frac{1}{\sqrt{1+\bar{z}^2}} \cdot {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, 1+\beta; 2+\beta; \frac{1}{1+\bar{z}^2}\right) - \frac{\bar{z}}{2(1-\nu)} \cdot \frac{d}{d\bar{z}} \left[\frac{1}{\sqrt{1+\bar{z}^2}} \cdot {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, 1+\beta; 2+\beta; \frac{1}{1+\bar{z}^2}\right) \right]. \quad (7)$$

Для слоистого тела с толщиной покрытия δ_1 и характеристиками основного материала и покрытия соответственно E_0, ν_0 и E_1, ν_1 , используя методику работы [8], имеем

$$E_{01}^* = E_1^* \cdot F_1, \quad (8)$$

$$F_1 = K_1(0) \left[\frac{(K_1(0) - K_1(\bar{\delta}_1))^2}{K_{01}(0) - K_{01}(\bar{\delta}_1)} + K_1(\bar{\delta}_1) \frac{K_0(\bar{\delta}_1)}{K_{01}(\bar{\delta}_1)} \cdot \frac{E_1^*}{E_0^*} \right]^{-1}, \quad (9)$$

где $E_i^* = \frac{E_i}{1-\nu_i^2}$, $K_i(0) = K_i(0, \beta, \nu_i)$,

$K_i(\bar{\delta}_1) = K_i(\bar{\delta}_1, \beta, \nu_i)$, $\bar{\delta}_1 = \delta_1/a$. Для определения $K_{01}(\bar{\delta}_1)$ нужно знать ν_{01} . Так как значения функции

$K_i(\bar{z}, \beta, \nu_i)$ для $\nu = 0,25 \dots 0,5$ изменяются незначительно, для первой итерации следует принять $\nu_{01} = 0,5(\nu_0 + \nu_1)$. Для последующих итераций с погрешностью менее 1 % можно принять

$$\nu_{01} = \nu_1 + (\nu_0 - \nu_1) \frac{1 - F_{01}^{-1}}{1 - E_1^*/E_0^*}. \quad (10)$$

Количество итераций зависит от принятой точности.

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 [9 – 11]. Для описания опорной кривой используем распределение неполной бета-функции

$$\eta(\varepsilon) = \frac{B_\varepsilon(\bar{\alpha}, \bar{\beta})}{B(\bar{\alpha}, \bar{\beta})}, \quad (11)$$

где $B_\varepsilon(\bar{\alpha}, \bar{\beta})$, $B(\bar{\alpha}, \bar{\beta})$ – соответственно неполная и полная бета-функции;

$$\bar{\alpha} = \left(\frac{R_p}{R_q} \right)^2 \left(\frac{R_{\max} - R_p}{R_{\max}} \right) - \frac{R_p}{R_{\max}}, \quad \bar{\beta} = \bar{\alpha} \left(\frac{R_{\max}}{R_p} - 1 \right); \quad (12)$$

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

В этом случае плотность функции распределения неровностей по высоте

$$\phi'_n(u) = \frac{u^{\alpha-2} (1-u)^{\beta-2} [(\alpha-1)(1-u) - (\beta-1)u]}{\varepsilon_s^{\alpha-1} (1-\varepsilon_s)^{\beta-1}}, \quad (13)$$

где ε_s определяется из условия $\phi_n(\varepsilon_s) = 1$.

Радиус сферического сегмента можно определить, исходя из высоты сферического сегмента $H = \omega R_{\max}$ и радиуса основания a_c

$$R = \frac{a_c^2}{2\omega R_{\max}}, \quad (14)$$

где R_{\max} – максимальная высота неровностей, $\omega = 0,2 \dots 0,6$. Выражение (14) получено в предположении, что $R \gg R_{\max}$.

При упругом контакте зависимость между относительной величиной внедрения i -той неровности h_i/R и относительным усилием определяется из формулы Герца

$$\frac{P_{ei}}{E_{01}^* R^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h_i}{R} \right)^2; \quad (15)$$

при упругопластическом [12]

$$\frac{P_{epi}}{E_{01}^* R^2} = e^{-B} \left(\frac{h_i}{R} \right)^A, \quad (16)$$

где $A = A(\varepsilon_y, n)$, $B = B(\varepsilon_y, n)$ – коэффициенты;
 $\varepsilon_y = \sigma_y / E_{01}^*$.

При использовании выражений (15) и (16) для неровностей шероховатой поверхности следует учитывать, что

$$h_i = (\varepsilon - u) R_{\max}, \quad (17)$$

$$\frac{h_i}{R} = \frac{(\varepsilon - u) \cdot 2\omega R_{\max}^2}{a_c^2} = \left(\frac{\varepsilon - u}{2\omega} \right) \cdot \left(\frac{2\omega R_{\max}}{a_c} \right)^2, \quad (18)$$

где ε – относительное сближение шероховатой поверхности и полупространства с покрытием; u – исходное состояние до вершины i -той неровности.

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

$$\bar{\delta}_1 = \frac{\delta_1}{a_r} = \frac{\delta_1}{a_c} \cdot \frac{a_c}{a_r} = \gamma \cdot \eta_i^{-0.5}, \quad (19)$$

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

$$h_{ci} = c_i^2 \cdot h_i \quad (20)$$

Для упругого контакта $c_i^2 = 0,5$. Для упругопластического – используем данные работы [13]:

$$c_i^2 = \frac{h_{ci}}{h_i} = M^{\frac{2}{N}} \left(2 \frac{h}{R} \right)^{\frac{2}{N}-1}, \quad (21)$$

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

С учетом выражений (14), (18) и того, что

$$\eta_i = \frac{2\pi R h_{ci}}{\pi a_c^2}, \quad (22)$$

получим

$$\eta_i^{-0.5} = (2M)^{\frac{1}{N}} \left(\frac{2\omega R_{\max}}{a_c} \right)^{1-\frac{2}{N}} \left(\frac{\varepsilon - u}{2\omega} \right)^{\frac{1}{N}}. \quad (23)$$

Таким образом, для каждой контактирующей неровности согласно выражению (8) имеем

$$E_{01}^* (\gamma, \varepsilon, u) = E_1^* F_1^* (\gamma, \varepsilon, u), \quad (24)$$

где $F_1^* (\gamma, \varepsilon, u)$ определяется с учетом выражений (9) и (10).

Тогда выражения (15) и (16) представим в виде

$$\frac{P_{ei} (\gamma, \varepsilon, u)}{E^* R^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h_i (\varepsilon, u)}{R} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot F_1^* (\gamma, \varepsilon, u), \quad (25)$$

$$\frac{P_{epi} (\gamma, \varepsilon, u)}{E^* R^2} = e^{-B} \left(\frac{h_i (\varepsilon, u)}{R} \right)^A \cdot F_1^* (\gamma, \varepsilon, u). \quad (26)$$

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

$$P = \int_{\varepsilon - \varepsilon_e}^{\varepsilon} P_{ei} dn_r + \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_e} P_{epi} dn_r, \quad (27)$$

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

$$dn_r = n_c \phi'_n (u) du, \quad n_c = \frac{A_c}{\pi a_c^2}, \quad (28)$$

$\phi'_n (u)$ – плотность функции распределения неровностей по высоте (13).

По данным [6]

$$\varepsilon_e = \frac{\pi^2 K_c^2 \varepsilon_y^2 a_c^2}{8\omega R_{\max}^2}, \quad (29)$$

где $K_c = 1,613$ – коэффициент, учитывающий начало пластической деформации внутри полупространства под вершиной неровности.

Подставляя выражение (28) в (27), имеем

$$\frac{P}{A_c} = q_c = \int_{\varepsilon - \varepsilon_e}^{\varepsilon} q_{cei} \cdot \phi'_n (u) du + \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_e} q_{cepi} \cdot \phi'_n (u) du, \quad (30)$$

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

Обозначая

$$\frac{q_c a_c}{\omega R_{\max} E_1^*} = F_q, \quad (31)$$

с учетом (18), (25), (26), окончательно получим

$$F_q (\gamma, \varepsilon, \varepsilon_e) = \frac{8}{3\pi} \int_{\varepsilon - \varepsilon_e}^{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon - u}{2\omega} \right)^{\frac{3}{2}} F_1^* (\gamma, \varepsilon, u) \phi'_n (u) du + \frac{2^{2(A-1)} e^{-B}}{\pi} \left(\frac{\omega R_{\max}}{a_c} \right)^{2A-3} \times \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_e} \left(\frac{\varepsilon - u}{2\omega} \right)^A F_1^* (\gamma, \varepsilon, u) \phi'_n (u) du \quad (32)$$

Для фактической площади контакта, аналогично выражению (27), имеем

$$A_r = \int_{\varepsilon - \varepsilon_c}^{\varepsilon} A_{rei} dn_r + \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_c} A_{repi} dn_r. \quad (33)$$

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

$$\eta(\varepsilon, \varepsilon_c) = \frac{8}{3\pi} \int_{\varepsilon - \varepsilon_c}^{\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon - u}{2\omega} \right) \phi'_n(u) du + (2M)^{\frac{2}{N}} \left(\frac{2\omega R_{max}}{a_c} \right)^{2\left(\frac{2}{N}-1\right)} \times \int_0^{\varepsilon - \varepsilon_c} \left(\frac{\varepsilon - u}{2\omega} \right)^{\frac{2}{N}} \phi'_n(u) du \quad (34)$$

Следует отметить, что при определении коэффициентов A, B и M, N , входящих в выражения (32) и (34),

$$\varepsilon_y = \varepsilon_y(\gamma, \varepsilon, u) = \frac{\sigma_y}{E_1^* F_1^*(\gamma, \varepsilon, u)}; \quad (35)$$

параметр β , входящий в (7), согласно [4, 5] определяется выражением

$$\beta = A(\varepsilon_y, n) - 1. \quad (36)$$

Таким образом, получена замкнутая система трансцендентных уравнений, позволяющая определить относительную площадь контакта η в зависимости от безразмерного силового упругогеометрического параметра при контактировании жесткой шероховатой поверхности через упругопластическое покрытие.

Обсуждение полученных результатов.

Решение системы трансцендентных уравнений для контактирования жесткой шероховатой поверхности с виртуальным слоистым телом, состоящем из упругого основного материала и упругопластического покрытия, производилось в системе Mathcad. Константы упругости основного материала и покрытия соответственно равны $E_0 = 200$ МПа; $\nu_0 = 0,25$; $E_1 = 80$ МПа; $\nu_1 = 0,3$. Результаты вычислений представлены на рис. 1. в виде зависимостей относительной площади контакта η от безразмерного силового упругогеометрического параметра F_q при: различных значениях относительной толщины покрытия γ (а); разных значениях показателя экспоненты упрочнения n (б); разном отношении σ_{y1}/E_1^* (в). В приведенных результатах расчетов параметры микрогеометрии $R_{max} = 4$ мкм и $a_c = 5$ мкм выбирались таким образом, чтобы для заданного диапазона F_q обеспечивался упругопластический контакт для единичной неровности. Так как в настоящее время не исследованы вопросы о влиянии толщины покрытия δ и соотношения физико-механических характеристик материалов основания и покрытия на начало пластической деформации основания, то остается открытым вопрос об определении границы применимости γ_{min} используемой жесткостной модели слоистого тела с упругопластическим покрытием.

Поэтому в расчетах минимальное значение γ_{min} принималось равным 2.

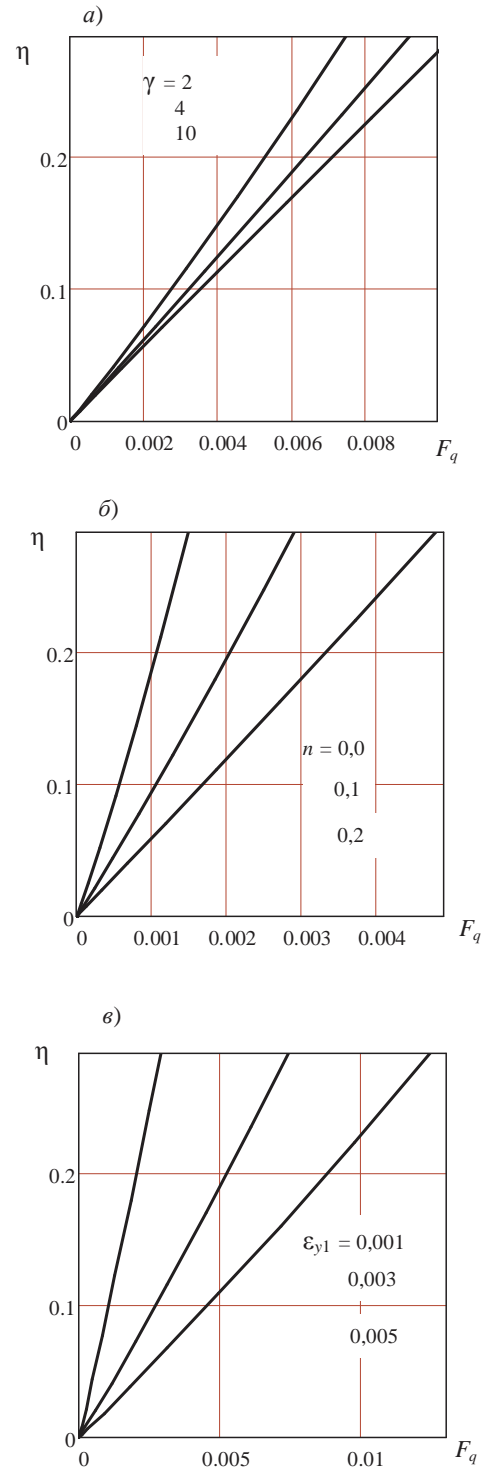


Рис. 1. Зависимость $\eta(F_q)$ при разных значениях: относительной толщины покрытия γ ; б) показателя экспоненты упрочнения n ; в) отношения $\varepsilon_{y1} = \sigma_{y1}/E_1^*$.

Как следует из рис. 1а, с уменьшением относительной толщины покрытия γ относительная площадь контакта η увеличивается. С одной стороны это объясня-

ется тем, что при этом увеличивается значение E_{01}^* , а значение $\varepsilon_y = \varepsilon_{y1}/E_{01}^*$ уменьшается. С другой стороны при упругопластическом контакте с ростом нагрузки значение c^2 увеличивается и может быть больше единицы, тогда как при упругопластическом контакте $c^2 = 0,5$. С увеличением значения γ относительная площадь контакта стремится к значению для однородного материала. В приведенном случае для $\gamma = 10$ $F_1 = 1,055$.

Для большинства конструкционных металлических материалов $n = 0 \dots 0,2$ $\varepsilon_y = 0,001 \dots 0,005$. Как следует из рис. 1б и рис. 1в, при изменении этих параметров в указанных пределах значение относительной площади контакта может изменяться в разы.

Заключение.

1. С использованием жесткостной модели слоистого тела получена система трансцендентных уравнений для определения относительной площади контакта жесткой шероховатой поверхности со слоистым полупространством с упругопластическим покрытием.

2. При упругопластическом контакте с уменьшением относительной толщины покрытия относительная площадь контакта η увеличивается, тогда как при упругом контакте уменьшается. Очевидно, что возможно такое сочетание параметров ε_{y1} , n , γ , ε , при котором влияние толщины покрытия будет не значительно, т.е. влияние упругой и упругопластической деформации будет соизмеримо.

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.

Литература

1. Огар П.М., Максимова О.В., Автушко А.Н., Устюжанин Е.В. Контакт шероховатой поверхности со слоистым упругим полупространством // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2006. Т.2. С. 302-307.

2. 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.

3. Ланков А.А. Вероятность упругих и пластических деформаций при сжатии металлических шероховатых поверхностей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. №3. С. 3-5.

4. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Развитие инженерных расчетов характеристик контакта жесткой сферы с упругопластическим полупространством // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1(33). С.80–87.

5. Турченко А.В. Особенности расчета характеристик контакта жесткой сферы с упругопластическим полупространством // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. 2012. № 1. С. 176-183.

6. 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(35). С.42-45.

7. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир. 1989. 510с.

8. 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 - развитию регионов Сибири. 2006. № 2. С. 297-302.

9. Огар П.М. Контактные характеристики и герметичность неподвижных стыков пневмогидроопливающих систем двигателей летательных аппаратов: дис. ...д-ра техн. наук. Братск, 1997. 345 с.

10. Огар П.М., Шеремета Р.Н., Лханаг Д. Герметичность металлополимерных стыков шероховатых поверхностей. Братск, БрГУ, 2006. 158 с.

11. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей: фрактальный подход. Братск: БрГУ, 2007. 171 с.

12. Collin J.-M., Mauvoisin G., Pilvin P. Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches // Materials and Design. 2010. Vol. 31. P. 636-640.

13. Hernot X., Bartier O., Bekouche Y., Mauvoisin G., El Abdi R. 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.

Литература

14. Огар П.М., Максимова О.В., Автушко А.Н., Устюжанин Е.В. Контакт шероховатой поверхности со слоистым упругим полупространством // Труды Братского государственного университета: Серия: Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири. 2006. Т.2. С. 302-307.

15. 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.

16. Ланков А.А. Вероятность упругих и пластических деформаций при сжатии металлических шероховатых поверхностей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. №3. С. 3-5.

17. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Развитие инженерных расчетов характеристик контакта жесткой сферы с упругопластическим полупространством // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1(33). С.80–87.

18. Турченко А.В. Особенности расчета характеристик контакта жесткой сферы с упругопластическим полупространством // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки - развитию регионов Сибири. 2012. № 1. С. 176-183.

19. 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(35). С.42-45.

20. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир. 1989. 510с.

21. 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 - развитию регионов Сибири. 2006. № 2. С. 297-302.

22. Огар П.М. Контактные характеристики и герметичность неподвижных стыков пневмогидроопливающих систем двигателей летательных аппаратов: дис. ...д-ра техн. наук. Братск, 1997. 345 с.

23. Огар П.М., Шеремета Р.Н., Лханаг Д. Герметичность металлополимерных стыков шероховатых поверхностей. Братск, БрГУ, 2006. 158 с.

24. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей: фрактальный подход. Братск: БрГУ, 2007. 171 с.

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

Hernot X., Bartier O., Bekouche Y., Mauvoisin G., El Abdi R. 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