

# Особенности контакта жесткой шероховатой поверхности с упругопластическим полупространством при разгрузке\*

П.М. Огар<sup>a</sup>, В.А. Тарасов<sup>b</sup>, Д.Б. Горохов<sup>c</sup>

Размер шрифта 12

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия  
<sup>a</sup>ogar@brstu.ru, <sup>b</sup>TV-post@yandex.ru, <sup>c</sup>denis\_gorohov@mail.ru  
 Статья поступила 15.06.2014, принята 20.08.2014

Размер шрифта 9

В статье исследован вопрос об изменении относительной площади контакта при снижении нагрузки, приложенной к шероховатой поверхности. Изначально рассмотрено внедрение жесткой шероховатой сферы (индентора) в упругопластическое упрочняемое полупространство, а также упругое восстановление отпечатка при разгрузке. При описании упругопластического материала использован степенной закон Холломона (Hollomon power law). Площадь контакта при упругом восстановлении определена с учетом эффектов «sink-in/pile-up». Для описания контакта жесткой шероховатой поверхности использована дискретная модель шероховатой поверхности. Микронеровности, представленные в виде набора одинаковых сферических сегментов, распределены по высоте, соответствующей опорной кривой профиля реальной шероховатой поверхности. При описании опорной кривой использовано распределение неполной бета-функции. Параметры опорной кривой определены через высотные параметры шероховатости согласно стандарту ISO 4281/1-1997. Получены зависимости безразмерного силового упругогеометрического параметра  $F_q$  от относительной величины внедрения  $\epsilon$  при нагружении и аналогичного параметра  $F_{qe}$  от величины  $\epsilon - \Delta\epsilon$  при разгрузке. Показаны зависимости относительных площадей контакта  $\eta$  и  $\eta_e$  от безразмерных нагрузок  $F_q$  и  $F_{qe}$  при нагружении и разгрузке для разных значений экспоненты упрочнения  $n$  и параметра  $\epsilon_y = \sigma_y / E^*$ , где  $\sigma_y$  – предел текучести,  $E^*$  – контактный модуль упругости. Полученные результаты имеют практическое значение для прогнозирования эксплуатационных показателей неподвижных соединений деталей машин на стадии проектирования, в частности при обеспечении герметичности фланцевых соединений и затворов сосудов высокого давления.

**Ключевые слова:** шероховатая поверхность, упругопластическое полупространство, степенной закон Холломона, разгрузка, упругое восстановление отпечатка, относительная площадь контакта.

## Some peculiarities of a contact of a rigid rough surface with elastoplastic half-space under load relief

Размер шрифта 16

P.M. Ogar<sup>a</sup>, V.A. Tarasov<sup>b</sup>, D.B. Gorohov<sup>c</sup>

Размер шрифта 12

Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia  
<sup>a</sup>ogar@brstu.ru, <sup>b</sup>TV-post@yandex.ru, <sup>c</sup>denis\_gorohov@mail.ru  
 Received 15.06.2014, accepted 20.08.2014

Размер шрифта 9

The article deals with the issue of relative area change under decrease of a rigid rough sphere (indenter) into elastoplastic hardenable half-space. Indentation has also been considered. Dint elastic recovery under load relief has been considered. When describing elastoplastic material, Hollomon power law has been used. Contact area in the elastic recovery has been defined with taking into account the effects of «sink-in/pile-up». To describe a contact of a rigid rough surface with elastoplastic half-space a discrete model of a rough surface has been used. Microroughnesses have been shown as a set of identical spherical segments, distribution in altitude of which corresponds to bearing profile curve of a real surface. To describe the bearing profile curve, incomplete beta function of distribution has been used. Parameters of the bearing profile curve have been defined by means of altitude roughness parameters according to the standard ISO 4281/1-1997. The dependence of the dimensionless force elasto-geometric parameter  $F_q$  on a relative coefficient of indentation  $\epsilon$  under loading and the dependence of analogous parameter  $F_{qe}$  on coefficient of  $\epsilon - \Delta\epsilon$  under load relief have been received. The dependences of relative contact areas  $\eta$  and  $\eta_e$  on dimensionless loads  $F_q$  and  $F_{qe}$  under loading and load relief have been given for various values of the hardening exponent  $n$  and the parameter  $\epsilon_y = \sigma_y / E^*$  (where  $\sigma_y$  is a yield strength,  $E^*$  is a contact elastic modulus). The findings are of practical importance for the performance prediction of fixed joints of machine elements at the design stage and, in particular, for tightness supply of flange couplings and the seals of high pressure vessels.

**Keywords:** rough surface, elastoplastic half-space, Hollomon's power law, load relief, dint elastic recovery, relative contact area.

\* Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки по проекту № 1754.

**Введение.** Многие эксплуатационные свойства соединений деталей машин и аппаратов, в том числе герметичность, определяются контактным взаимодействием шероховатых поверхностей [1]. В большинстве случаев при контактировании металлических шероховатых поверхностей контакт является упругопластическим [2]. В ряде недавних работ [3 – 8] для описания упругопластического контакта авторы использовали диаграммы кинетического индентирования сферой. Как следует из обзора работ [9 – 11], герметизирующая способность уплотнительного стыка определяется относительной плотностью зазоров в стыке. ...

**Контакт жесткой сферы с упругопластическим полупространством.** Рассмотрим внедрение жесткой сферы (индентора) в упругопластическое упрочняемое полупространство и упругое восстановление отпечатка. В литературе при описании упругопластического контакта упрочняемого материала широко используется степенной закон Холломона (Hollomon's power law):

$$\sigma = \begin{cases} \epsilon E, & \epsilon \leq \epsilon_y; \\ K_{ep} \epsilon^n, & \epsilon > \epsilon_y, \end{cases} \quad (1)$$

где  $n$  – экспонента упрочнения;  $\epsilon_y = \sigma_y/E$ ,  $\sigma_y$  – предел текучести,  $E$  – модуль упругости....

Все рисунки выполняются с разрешением минимум 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов в формате \*.BMP, .TIFF, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. Схемы, графики выполняются во встроенной программе MS Word или в MS Excel с оттенком серого. Ширина рисунка с надписью не должна превышать 84 мм (рисунки должны помещаться внутри колонок). Если это невозможно, максимальный размер рисунка с надписью должен удовлетворять требованиям: ширина не более 150 мм, высота 245 мм.

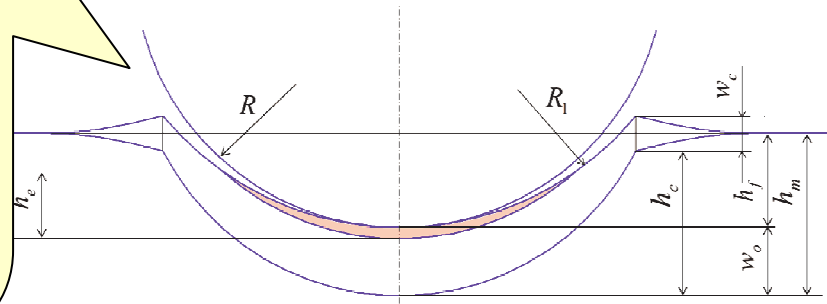


Рис. 2. Схема упругого восстановления отпечатка при разгрузке сферического индентора

**Контакт жесткой шероховатой поверхности с упругопластическим полупространством.** Воспользуемся дискретной моделью шероховатости, в которой микронеровности представлены в виде набора одинаковых сферических сегментов, распределение которых по высоте соответствует опорной кривой профиля реальной поверхности [1]. Для описания опорной кривой используем распределение неполной бета-функции:

$$\eta(\epsilon) = \frac{B_\epsilon(p, q)}{B(p, q)},$$

где  $B_\epsilon(p, q)$ ,  $B(p, q)$  – соответственно неполная и полная бета-функции:

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

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

В этом случае плотность функции распределения неровностей по высоте:

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

где  $\epsilon_s$  определяется из условия  $\phi_n(\epsilon_s) = 1$  [1].

Геометрические параметры сферического сегмента: высота  $\omega R_{max}$ , где  $\omega = 1 - \epsilon_s$ ; радиус основания  $a_c$ ; радиус:

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

где  $R \gg R_{max}$ .

При упругом контакте зависимость между относительной величиной внедрения  $i$ -ой неровности  $h_i/R$  и контактным модулем упругости  $E^*$  описывается выражением [3]:

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

При вставке формул использовать Microsoft Equation 3.0. (см. к сведению авторов) [http://brstu.ru/static/unit/journal\\_smt/docs/k\\_sved\\_avtorov.pdf](http://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/k_sved_avtorov.pdf)

где  $E^*$  – контактный модуль упругости. ...

**Заключение**

1. Впервые, по мнению авторов, получены зависимости, позволяющие прогнозировать изменение относительной площади контакта при уменьшении нагрузки, приложенной к стыку шероховатых поверхностей.

2. При этом показана роль параметров упрочняемости материала  $\epsilon_y$  и  $n$ . С ростом упрочняемости материала (увеличением значений  $\epsilon_y$  и  $n$ ) относительная площадь контакта при разгрузке (рис. 4 увеличивается).

3. При определении параметров  $\epsilon_y$  и  $n$  использовались результаты работы [17], полученные для значения коэффициента трения  $\mu = 0$ . В настоящей работе влияние трения на характеристики контакта не исследовалось. При внедрении сферы этот вопрос исследован в работах [18, 19]. В дальнейших исследованиях характеристик

Размер шрифта 10

Размер шрифта 9

Размер шрифта 10

контакта шероховатой поверхности этот вопрос будет рассмотрен. пластического покрытия // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 3. С. 42-45.

#### Литература

1. Огар П.М., Горохов Д.Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей: фрактальный подход. Братск: БрГУ, 2007, 171 с.
2. 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.
3. 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. С. 80-87.
4. Огар П.М., Тарасов В.А., Турченко А.В. Описание взаимодействия жесткой сферы с упругопластическим полупространством // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2012. Т. 1. С. 163-169.
5. 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.
6. Lankov A.A. Probability of elastic and plastic deformations while compressing metal rough surfaces // Treniye i smazka v mashinakh i mekhanizmax. 2009. №3. P. 3-5.
7. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Elaboration of engineering calculation for contact characteristics of a rigid sphere and elastoplastic half-space // Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye. 2012. № 1(33). P. 80-87.
8. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Description of the contact of a rigid sphere and elastoplastic half-space // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennyye i inzhenernyye nauki. 2012. T. 1. P. 163-169.
9. Ogar P.M., Tarasov V.A., Turchenko A.V. Rough rigid surface contacting through the elastoplastic coating layer // Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovaniye. 2012. № 3. P. 42-45.

Размер шрифта 9

Правила оформления списка литературы:

[http://brstu.ru/static/unit/journal\\_smt/docs/gost.pdf](http://brstu.ru/static/unit/journal_smt/docs/gost.pdf)

## Приложения к статье:

Сведения об авторах;

Авторская справка (шаблон: [http://brstu.ru/static/unit/journal\\_smt/index.php#](http://brstu.ru/static/unit/journal_smt/index.php#) Документы -> Авторская справка);

Экспертное заключение (шаблон: [http://brstu.ru/static/unit/journal\\_smt/index.php#](http://brstu.ru/static/unit/journal_smt/index.php#) Документы -> Бланк экс. закл.);

Рецензия внутренняя или внешняя.