

УДК 621.891

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО КОНТАКТА МИКРОНЕРОВНОСТЕЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2013 А.Н. Болотов, В.В. Мешков, О.В. Сутягин, М.В. Васильев

Тверской государственной технической университет

Поступила в редакцию 27.03.2013

Используя метод конечных элементов и приближённые методы исследованы характеристики контактного взаимодействия сферического индентора, моделирующего единичную неровность в условиях упругопластических контактных деформаций. Оценено влияние выпучивания и упрочнения материала при его контактной деформации. Предложены уточнённые расчётные соотношения.

Ключевые слова: *упругопластический контакт, метод конечных элементов, сферический индентор, внедрение, выпучивание, упрочнение*

Повышение надёжности и долговечности трибосопряжений изделий машиностроения возможно на базе глубокого изучения процессов фрикционного взаимодействия. Для исследования этих процессов необходимо иметь исчерпывающую информацию о характеристиках контакта микронеровностей шероховатых поверхностей, образуемых в результате механической обработки. В работах [1, 2], посвящённых исследованию процессов контактного и фрикционного взаимодействия шероховатых поверхностей, использовались решения контактных задач для сферической модели единичной микронеровности, полученные в теории упругости и пластичности. В дальнейшем [3] было получено приближённое решение для внедрения сферического индентора в упругопластическое полупространство, на основании которого были разработаны соотношения для оценки характеристик упругопластического контакта шероховатых поверхностей. Однако исследований фактической площади контакта, убедительно подтверждающих эти зависимости, проводилось недостаточно. Тем не менее, очевидно, что она оказывает значительное влияние на процессы в зоне фрикционного взаимодействия.

Болотов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная физика». E-mail: alnikbltov@rambler.ru

Мешков Владимир Валентинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и автоматизация машиностроения». E-mail: vvm@istu.tver.ru

Сутягин Олег Вениаминович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология и автоматизация машиностроения». E-mail: sutyagine@rambler.ru

Васильев Максим Викторович, аспирант. E-mail: makcvasyliiev@yahoo.com

Традиционно [1] фактическая площадь контакта оценивается коэффициентом упругой осадки выступов α , определяемой как отношение фактической площади контакта сферического индентора к площади контакта воображаемой проекции сферы на глубине фактического внедрения индентора. При упругом контакте $\alpha=0,5$, а при идеально-пластическом $\alpha=1,0$. Соответственно в идеализированных условиях закономерности изменения α ограничены этими значениями [3]. Однако при выпучивании значения α могут быть больше 1. Уточнить имеющиеся данные можно численными исследованиями упругопластических контактных деформаций с использованием метода конечных элементов (МКЭ), применяя расчётную модель (РМ), описанную в [4]. Исследование с помощью МКЭ подтвердило выпучивание материала полупространства вокруг индентора при его внедрении.

Для анализа влияния выпучивания на коэффициент упругой осадки α были численно исследованы металлы и сплавы, деформируемые идеально-жёстким сферическим индентором. Результаты расчётов МКЭ приведены на рис. 1. Как видно из представленных данных α может быть больше 1 и является функцией не только $k_2=N/N_{кр2}$, где k_2 – относительная нагрузка 2-го рода, $N_{кр2}$ – критическая нагрузка 2-го рода, N – текущая нагрузка [4], но зависит от параметров диаграмм напряжённо-деформированного состояния материалов. Полученные результаты удовлетворительно описываются степенной функцией вида

$$\alpha = A \cdot k_2^n, \quad (1)$$

где A и n – коэффициенты, зависящие от параметров диаграмм напряжённо-деформированного состояния материалов.

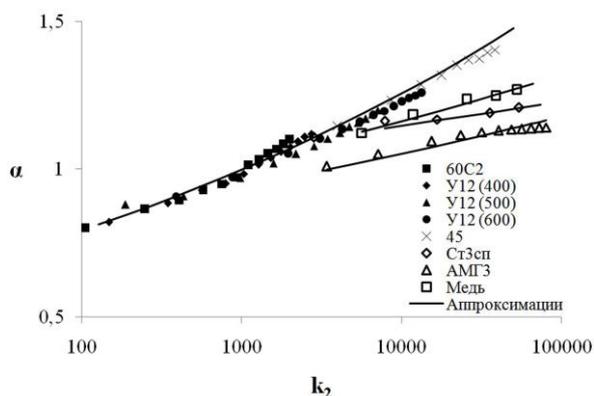


Рис. 1. Влияние выпучивания на изменение коэффициента α от относительной нагрузки k_2

Соотношение для расчётов внедрения идеально-жесткого сферического индентора в упругопластическое полупространство, полученное в работе [3], используя метод относительных нагрузок [5], с учётом выпучивания можно представить в виде:

$$d_2 = 0,2 \cdot \left(\frac{k_2}{\alpha} + 4 \cdot \sqrt{k_2 \cdot \alpha} \right), \quad (2)$$

где $d_2 = a/a_{кр2}$ – относительное внедрение сферического индентора 2-го рода, $a_{кр2}$ – внедрение сферического индентора, рассчитываемое по формуле Герца при критической нагрузке 2-го рода.

Учитывая соотношение (1), соотношение (2) можно записать в виде:

$$d_2 = \frac{1}{5A} \cdot \left(k_2^{1-n} + 4 \cdot A^{\frac{3}{2}} \cdot k_2^{\frac{n+1}{2}} \right). \quad (3)$$

Для радиуса пятна контакта сферической модели единичной неровности, взаимодействующей с упругопластическим полупространством, на основании геометрических построений и исходя из определения коэффициента α с учётом (3) после преобразований получим:

$$\rho_2 = 1,6 \cdot \frac{\sigma_s \cdot R}{E_*} \cdot \left(k_2 + 4 \cdot A^{\frac{3}{2}} \cdot k_2^{\frac{3n+1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где ρ_2 – радиус пятна контакта при использовании относительной нагрузки 2-го рода, R – радиус сферического индентора, σ_s – предел текучести, E_* – приведённый модуль упругости.

Результаты расчётов по соотношению (3) в сопоставлении с экспериментальными данными, представленными в работах [6-8], а также расчётами, проведёнными МКЭ для аналогичных условий, показаны на рис. 2. Тут же приведены данные для $\alpha = 1$, при которых соотношение (2)

будет после преобразований совпадать с решением, приведённым в работе [3].

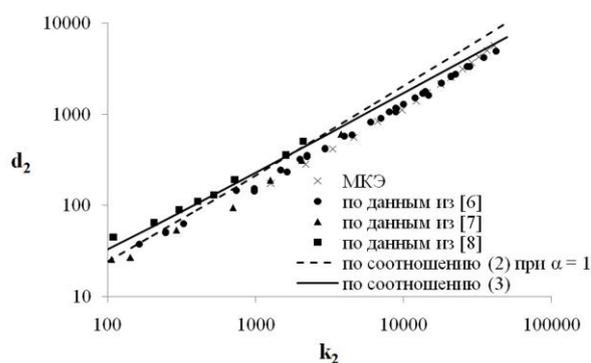


Рис. 2. Сопоставление результатов экспериментальных исследований внедрения сферического индентора с расчётами

Результаты расчётов с помощью МКЭ лучше соответствуют экспериментальным данным, чем расчёты по соотношению (3). Это связано с учётом в РМ не только выпучивания, но и упрочнения металла в процессе деформации. При внедрении сферического индентора упрочнение материала можно учесть эмпирическим законом Мейера [9]. Для нормальной нагрузки N закон Мейера можно записать:

$$N = G \cdot (2\rho)^m, \quad (5)$$

где G и m – параметры закона Мейера.

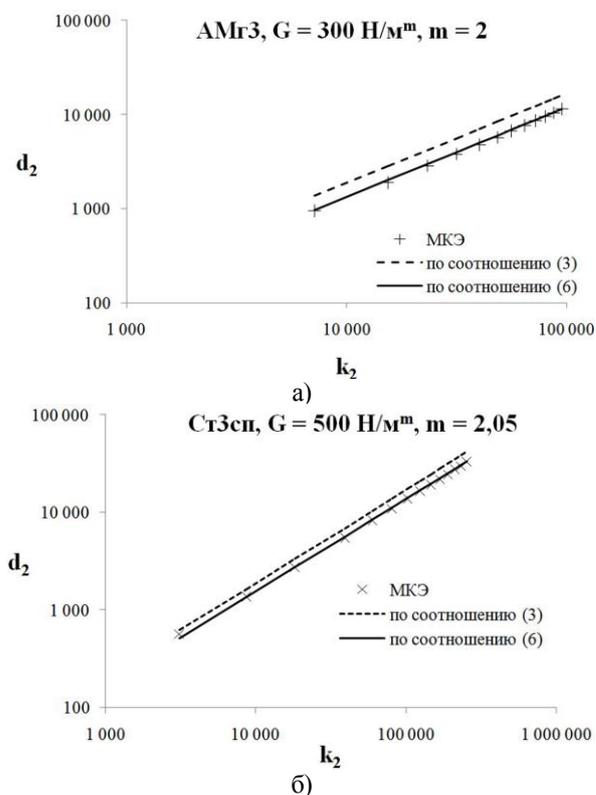


Рис. 3. Влияние упрочнения металлов на характеристики контакта: а) для АМГ3; б) для Ст3сп

Учитывая (4) и (5), после преобразований получим:

$$d_2 = \frac{k_2^{\frac{2-mn}{m}}}{51,5 \cdot A} \cdot \left(\frac{22 \cdot \sigma_s}{G} \right)^{\frac{2}{m}} \cdot \left(\frac{E_*}{\sigma_s \cdot R} \right)^{\frac{2m-4}{m}}. \quad (6)$$

Соотношение (6) учитывает как выпучивание материала (коэффициенты A и n), так и его упрочнение согласно закону Мейера (коэффициенты G , m). На рис. 3а представлено сопоставление расчётов по соотношениям (3), (6) и с помощью МКЭ для сплава АМг3, а на рис.3б – для мягкой стали. Результаты расчётов по соотношению (6) показывают хорошее совпадение с расчётами МКЭ при указанных значениях параметров G и m .

Выводы: учёт выпучивания и упрочнения может существенно повысить точность расчётов характеристик контакта в условиях упругопластических деформаций. Приведенные данные подчёркивают влияние индивидуальных физико-механических свойств реальных материалов на особенности формирования контактных упругопластических деформаций. Уточнённые характеристики контактного взаимодействия модели единичной неровности можно распространять на множественный контакт шероховатых поверхностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дёмкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Дёмкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
2. Михин, Н.М. Внешнее трение твёрдых тел. – М.: Наука, 1977. 221 с.
3. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. – Тверь: ТГТУ, 2010. 112 с.
4. Болотов, А.Н. Исследование упругопластического контакта сферического индентора с металлами и твёрдосмазочными покрытиями. Часть 1: Критические нагрузки / А.Н. Болотов, В.В. Мешков, О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Трение и износ. 2013. Т. 34, №1. С. 5-10.
5. Ланков, А.А. Метод относительных нагрузок в изучении упругопластических деформаций / А.А. Ланков, Ал.Ан. Ланков // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Рига: РПИ, 1983. С. 62-70.
6. Дрозд, М.С. Инженерные расчёты упругопластической контактной деформации / М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
7. Алексеев, В.М. Характеристики контакта единичной неровности в условиях упругопластической деформации / В.М. Алексеев, О.О. Туманова, А.В. Алексеева // Трение и износ. 1995. Т. 16, № 6. С. 1070-1078.
8. Джонсон, К.Л. Механика контактного взаимодействия. – М.: Мир, 1989. 510 с.
9. Боуден, Ф.П. Трение и смазка твёрдых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тэйбор. – М.: Машиностроение, 1968. 542 с.

INFLUENCE OF HARDENING ON CHARACTERISTICS OF ELASTO-PLASTIC CONTACT OF SURFACE ASPERITIES

© 2013 A.N. Bolotov, V.V. Meshkov, O.V. Sutyagin, M.V. Vasilyev

Tver State Technical University

Using a method of final elements and approximate methods the characteristics of contact interaction of spherical indenter, modeling single roughness in the conditions of elasto-plastic contact deformations are investigated. Influence of swelling and material hardening at its contact deformation is estimated. The specified calculated relationships are offered.

Key words: *elasto-plastic contact, final elements method, spherical indenter, introduction, swelling, hardening*

Alexander Bolotov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Applied Physics". E-mail: alnikbltov@rambler.ru; Vladimir Meshkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technology and Automation of Machine Building". E-mail: vvm@tstu.tver.ru; Oleg Sutyagin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Technology and Automation of Machine Building". E-mail: sutyagine@rambler.ru; Maksim Vasilyev, Post-graduate Student. E-mail: makcvasilyev@yahoo.com