

УДК 621.891

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ КОНТАКТНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ТВЁРДОСМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© 2012 А.Н. Болотов, В.В. Мешков, О.В. Сутягин, М.В. Васильев

Тверской государственной технический университет

Поступила в редакцию 25.03.2012

Используя метод конечных элементов исследована критическая нагрузка, при которой происходит переход от упругих деформаций покрытия в пластические, площадь фактического контакта и внедрение сферического индентора, моделирующего единичную неровность в условиях упругопластических контактных деформаций. Результаты сопоставлены с теоретическими и экспериментальными данными других авторов, предложены соотношения, уточняющие полученные ранее зависимости.

Ключевые слова: *упругопластический контакт, твёрдосмазочные покрытия, метод конечных элементов*

Для обеспечения работоспособности и надёжности узлов трения в условиях космического пространства в качестве смазки широкое применение получили твёрдосмазочные покрытия. При этом в качестве материала покрытия используются как композиции на основе дисульфида молибдена и органического связующего [1], так и мягкие металлы и композиции с антифрикционными компонентами [2, 3]. На фрикционные характеристики таких трибосопряжений большое влияние оказывает напряженно-деформированное состояние в зоне контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, которое определяется характеристиками контакта единичных микронеровностей. Анализ таких взаимодействий начинается с исследования контакта модели единичной микронеровности (сферического индентора) с полупространством, имеющим покрытие [4]. В работах [5-7] были проведены теоретические и экспериментальные исследования упругопластических контактных деформаций единичного сферического индентора с полупространством, имеющим низко модульное покрытие, моделирующее, с известными допущениями,

твёрдосмазочное покрытие. Однако, как было показано в работе [8], проведение численных исследований упругопластических деформаций с использованием метода конечных элементов (МКЭ) позволяет существенно уточнить полученные ранее расчётные зависимости и учесть особенности поведения конкретных материалов при их упругопластическом деформировании.

В основу создания расчётных моделей (РМ) контактного взаимодействия сферического индентора с упругопластическим покрытием на упругом полупространстве положены принципы, использованные в [8]. Отличительной особенностью данных моделей является возможность и удобство изменения геометрических и физико-механических параметров контакта уже готовой модели, в частности, толщины покрытия. Данное преимущество реализовано за счёт того, что изначально создаются элементы одного типа – соответствующие материалу основания, и лишь потом необходимые конечные элементы (КЭ) модифицируются в элементы, соответствующие материалу покрытия. В основу конечно-элементного разбиения положен принцип изменения размера КЭ пропорционально расстоянию от площадки контакта. Кроме того, разбиение проведено таким образом, чтобы каждый нижележащий ряд КЭ вблизи площадки контакта образовывал прямую линию. Недостатком данной РМ, как и МКЭ в целом, является конечность геометрических размеров КЭ, что накладывает ограничения на диапазон исследуемых внедрений в рамках одного расчёта.

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 «Технологии и автоматизации машиностроения». E-mail: vmeshkov@tstu.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

Кроме того, ввиду недостатка данных по механическим свойствам используемых в расчётах материалов, относительно протяжённые участки кривой деформирования описывались линейно. В сумме эти допущения могут приводить к ступенчатости результатов расчётов, что учитывалось при их обработке, и в РМ вносились корректировки.

Для анализа результатов расчётов, теоретических и экспериментальных исследований рационально использовать относительную нагрузку и относительное внедрение [8, 9]. Зависимость для расчёта критической нагрузки можно получить, предполагая, что среднее упругое давление на пятне контакта сферического индентора с покрытием равно среднему давлению, возникающему при вдавливании индентора в пластическое покрытие [6]. Используя соотношения, полученные в работе [10], можно показать, что при таких допущениях критическая нагрузка $N_{кр}$ для упругопластического покрытия на упругом полупространстве будет определяться зависимостью вида

$$N_{кр} = N_{кр}^* \cdot f_1^3 \cdot f_2^2, \quad (1)$$

где $N_{кр}^*$ – критическая нагрузка для полупространства из материала покрытия, $N_{кр}^* = S \sigma_T^3 R^2 J_1^2$; $f_1 = 1 + (0,18 \rho / \delta)$ – функция, определяющая влияние основания на пластическое деформирование покрытия [7];

$$f_2 = \frac{J_2 + \frac{\delta}{2\rho}}{\sqrt{1 + \frac{\delta^2}{4\rho^2}}} - \text{функция, определяющая влияние}$$

основания на упругое деформирование покрытия [7]; S – коэффициент, зависящий от принятых условий начала пластических деформаций; σ_T – предел текучести материала покрытия; R – радиус сферического индентора; J_1, J_2 – упругие постоянные материала покрытия и полупространства; ρ – радиус пятна контакта, δ – толщина покрытия.

При условии, когда среднее упругое давление на пятне контакта сферического индентора с покрытием равно среднему давлению, возникающему при вдавливании индентора в пластическое покрытие, коэффициент $S=383$ [11]. Соответствующее этой нагрузке критическое внедрение индентора в покрытие $a_{кр}$ на основании тех же соотношений с учётом (1) можно записать в виде

$$a_{кр} = a_{кр}^* \cdot f_1^2 \cdot f_2^2, \quad (2)$$

где $a_{кр}^* = \left(\frac{3J_1 \cdot N_{кр}^*}{4\sqrt{R}} \right)^{\frac{2}{3}}$ – критическое внедрение в полупространство из материала покрытия.

Ранее [11] было показано, что пластические деформации полупространства при его взаимодействии со сферическим индентором начинаются при значении $S=22$, что соответствует более низким значениям критической нагрузки, чем рассчитываемым по зависимости (1) при $S=383$. Для исследования справедливости зависимости (1) применительно к покрытиям было проведено численное исследование перехода от упругого контакта к пластическому с использованием МКЭ. На рис. 1 представлены зоны распределения пластических деформаций (светлые области) в покрытии для $S=22$ (рис. 1а) и $S=383$ (рис. 1б).

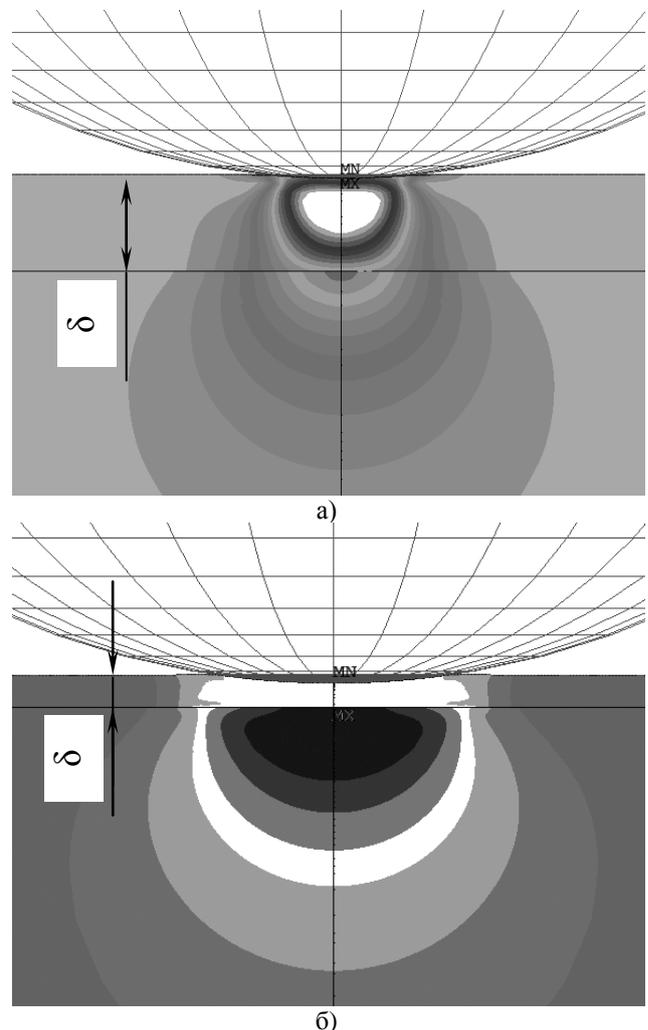


Рис. 1. Зоны распределения пластических деформаций покрытия

Отметим, что светлые области на рис. 1б соответствуют одинаковым значениям возникающих напряжений в покрытии и основании, которые приводят к пластическим деформациям покрытия, но в связи с большей прочностью

основания деформируют его в этих зонах упруго. Расчёты критической нагрузки для обоих случаев по соотношению (1) и с использованием МКЭ сопоставлены на рис. 2.

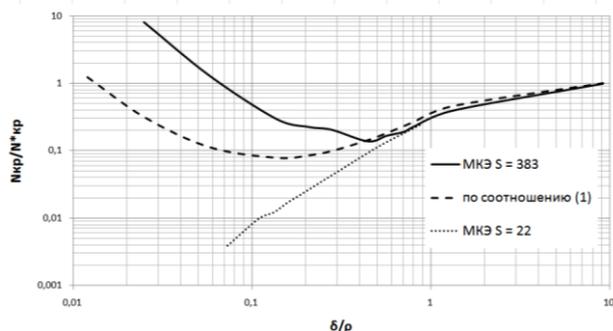


Рис. 2. Зависимость относительной нагрузки от отношения δ/ρ

Как видно из представленных данных мы имеем существенное расхождение между аналитической зависимостью (1) и результатами численных исследований. Это связано с тем, что при $S=22$ начинается зарождение пластических деформаций [11], которые начинают возникать в точке. В этом случае развитию пластических деформаций никак не препятствует основание (рис. 1а). Учитывая, что скорость роста средних упругих напряжений в покрытии значительно выше, чем в сплошном теле из того же материала [10], МКЭ даёт ожидаемую оценку изменения критической нагрузки при $S=22$. При $S=383$ (рис. 1б) глубина распространения пластических деформаций может быть соизмерима с толщиной покрытия, и влиянием основания на развитие пластических деформаций в покрытии в этом случае пренебрегать нельзя. Очевидно, что ограниченное объёма деформирования материала покры-

тия влияет на величину среднего давления, возникающего при внедрении сферического индентора, и мы наблюдаем экстремум, описанный в работе [6]. Различие в расчётах по соотношению (1) и МКЭ в данном случае связано с погрешностью функции f_1 , учитывающей влияние основания при пластической деформации покрытия [9], полученной аппроксимацией решения [4], справедливого для условий идеальнопластического покрытия, находящегося на жёстком основании и упомянутых ранее погрешностей МКЭ. Естественно, чем тоньше покрытие, тем большее влияние оказывает основание и большую ошибку вносят принятые допущения.

Важно также определить область применения полученных ранее зависимостей с учётом принимаемых начальных условий. Расхождения данных, получаемых МКЭ, с аналитическими зависимостями в нашем случае начинаются при начале пластических деформаций основания, так как все теоретические результаты получены в условиях деформирования упруго-пластического покрытия на упругом основании. Используя МКЭ, была проведена оценка влияния покрытий на зарождение пластических деформаций основания. В таблице 1 представлены результаты расчётов МКЭ, иллюстрирующих значительный рост критической нагрузки для полупространства, на которое нанесено покрытие. В зависимости от относительной толщины покрытия и комплекса его физико-механических свойств, величина критической нагрузки для полупространства – $N_{кр.осн.}$, рассчитанной по данным [11], может быть в сотни и более раз ниже, чем её фактические значения.

Таблица 1. Результаты расчетов МКЭ

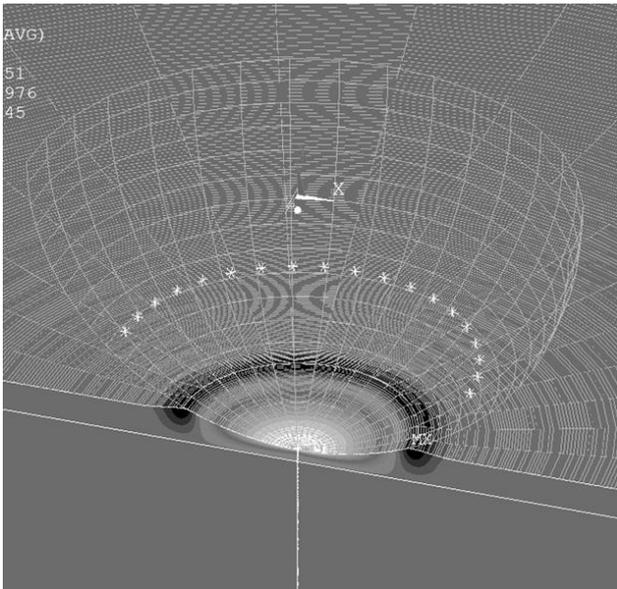
Параметр	Материал покрытия				
	ЭОНИТ	ЭОНИТ	ВНИИМП	Zn	Cu
δ/R	0,12	0,04	0,12	0,04	0,04
E , ГПа	1,2	1,2	2,4	90	120
σ_T , МПа	46	46	80	75	120
$N_{кр}/N_{кросн}$	21580	6242	16765	535	713

Как видно из приведенных данных, покрытия демпфируют развитие деформаций основания. Очевидно, что предельными нагрузками для рассматриваемых ограничений можно считать критические нагрузки для материала основания, рассчитываемые по данным [11] при условии, что в большинстве практических случаев можно принимать $S=500$ для мягких металлов и $S=5000$ для полимерных покрытий.

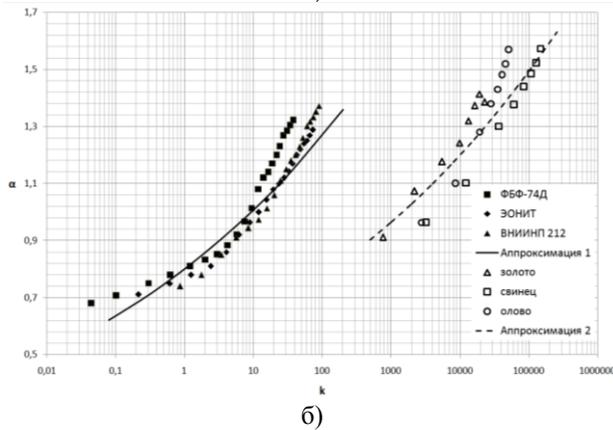
Отметим, что при этих условиях в полупространстве пластические деформации только начинают зарождаться.

При развитии пластической составляющей деформации аналогично с результатами, полученными для сплошных сред [8], важную роль в формировании напряженно-деформированного состояния покрытия начинает играть выпучивание материала покрытия (рис. 3а).

Влияние выпучивания на характеристики контактного взаимодействия сферического индентора с полупространством, на которое нанесено покрытие, удобно оценивать с помощью коэффициента α , определяющего отношение номинальной площади контакта к фактической [8]. На рис. 3б точками представлены результаты расчётов с помощью МКЭ зависимости коэффициента α от относительной нагрузки $k=N/N_{кр}$ для твёрдосмазочных покрытий на основе полимеров и мягких металлов.



а)



б)

Рис. 3. Влияние выпучивания на характеристики контактного взаимодействия

Полученные расчётные результаты удовлетворительно аппроксимируется показательной функцией вида

$$\alpha = A \cdot k^n, \quad (3)$$

где A и n – коэффициенты, зависящие от комплекса физико-механических свойств материала покрытия. Как показано на рис 3.б, для твёрдосмазочных покрытий на основе полимерных материалов $A=0,8$, а $n=0,1$ (аппроксимация 1), а

для твёрдосмазочных покрытий на основе мягких металлов можно считать, что $A=0,55$, а $n=0,09$ (аппроксимация 2). На основании решения, полученного в работе [7], с учётом соотношений (1) и (2), а также результатов работы [8] для относительного внедрения сферического индентора в упругопластическое покрытие на упругом основании $d=a/a_{кр}$ можно записать

$$d = 0,5 \cdot \frac{k}{\alpha} + 0,5 \cdot \sqrt{k \cdot \alpha} \quad (4)$$

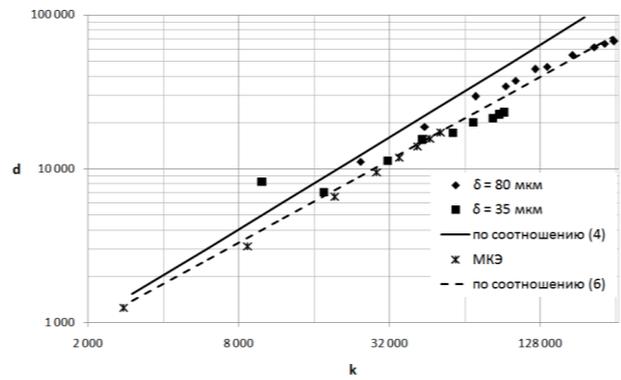
Подставляя в выражение (4) значения коэффициента α , определяемого по соотношению (3), для случая твёрдосмазочных покрытий на основе полимерных материалов получим

$$d = 0,6 \cdot k^{0,9} + 0,4 \cdot k^{0,55} \quad (5)$$

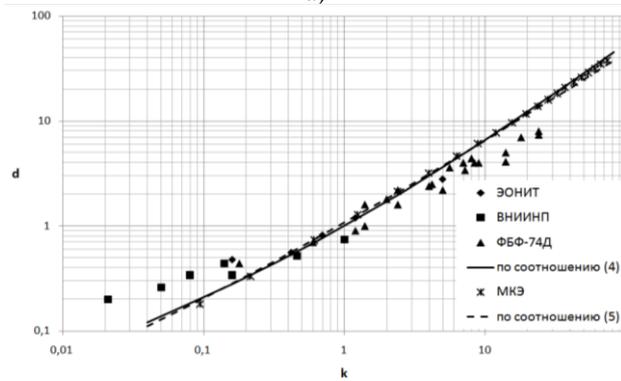
Для твёрдосмазочных покрытий на основе мягких металлов аналогично получим

$$d = 0,9 \cdot k^{0,9} + 0,4 \cdot k^{0,55} \quad (6)$$

Результаты расчётов по соотношениям (4)-(6) в сопоставлении с расчётами МКЭ и экспериментальными данными, полученными в работах [4] и [6], представлены на рис. 4.



а)



б)

Рис. 4. Зависимость относительного внедрения от относительной нагрузки: а) для покрытий из олова; б) для покрытий на основе полимеров

Как видно из представленных результатов, учёт выпучивания материала покрытия значительно повышает точность расчётов. Так, на рис. 4а точки, получаемые МКЭ, практически находятся на линии, рассчитанной по формуле (6), а экспериментальные данные, полученные в работе [4] для олова различной толщины, хорошо описываются расчётной зависимостью. Данные, представленные на рис. 4б, также хорошо соответствуют расчётам, полученным МКЭ, но имеют более значительные отклонения от экспериментальных данных, представленных в работе [6], в области малых относительных нагрузок. Последнее связано с систематической приборной погрешностью в этом диапазоне измерений. Эти данные ещё раз подчёркивают влияние индивидуальных физико-механических свойств материалов на особенности формирования контактных упругопластических деформаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Крагельский, И.В. Трение и износ в вакууме / И.В. Крагельский, И.В. Любарский, А.А. Гуляков и др. – М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
2. Пиус, Иван. Tribology of thin layers / Ivan Pius – Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam-Oxford-New York, 1980. 225 p.
3. Маленков, М.И. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов / М.И. Маленков, С.И. Каратушин, В.М. Тарасов. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2007. 54 с.
4. Алексеев, Н.М. Металлические покрытия опор скольжения. – М.: Наука, 1973. 75 с.
5. Макушкин, А.П. Полимеры в узлах трения и уплотнениях при низких температурах. – М.: Машиностроение, 1993. 288 с.
6. Дёмкин, Н.Б. Исследование деформирования твёрдосмазочного покрытия / Н.Б. Дёмкин, В.М. Алексеев, О.В. Сутягин // Трение и износ. 1988. Т.9, №3. С. 389-396.
7. Дёмкин, Н.Б. Исследование упругопластического деформирования низко модульных покрытий / Н.Б. Дёмкин, О.В. Сутягин, О.О. Туманова // Трение и износ. 1994. Т. 15, №2. С. 237-242.
8. Болотов, А.Н. Исследование упругопластических контактных деформаций металлов применительно к процессам фрикционного взаимодействия / А.Н. Болотов, О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, №4(3). С. 977-981.
9. 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.
10. Дёмкин, Н.Б. Влияние твёрдосмазочных покрытий на свойства фрикционного контакта / Н.Б. Дёмкин, О.В. Сутягин // Всесоюзный семинар с международным участием «Триболог-5М», часть 2. – Рыбинск, 1989. С. 31-37.
11. Болотов, А.Н. Критерий перехода к пластическим контактным деформациям в тяжело нагруженных узлах трения деталей машин / А.Н. Болотов, О.В. Сутягин, М.В. Васильев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. №1. С. 211-213.

RESEARCH THE ELASTIC-PLASTIC CONTACT DEFORMATIONS OF HARD LUBRICANT COVERING AT SPACE AIRCRAFT FRICTION UNITS

© 2012 A.N. Bolotov, V.V. Meshkov, O.V. Sutyagin, M.V. Vasilyev

Tver State Technical University

Using a finite element method it was researched the critical load at which there is a transition from elastic deformations of covering in plastic ones, true contact area and introduction of spherical indenter, modeling the single roughness in the conditions of elastic-plastic contact deformations. Results are compared with theoretical and experimental data of other authors, the ratios, specifying received before dependences, are offered.

Key words: *elastic-plastic contact, hard lubricant coverings, finite element method*

Alexander Bolotov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Applied Physics". E-mail: alnikboltov@rambler.ru

Vladimir Meshkov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department "Technologies and Automation of Mechanical Engineering". E-mail: vmeshkov@tstu.tver.ru

Oleg Sutyagin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department "Technologies and Automation of Mechanical Engineering". E-mail: sutyagine@rambler.ru

Maxim Vasilyev, Post-graduate Student. E-mail: makcvasilyev@yahoo.com