

СКОЛЬЖЕНИЕ СИСТЕМЫ ИНДЕНТОРОВ ПО ВЯЗКОУПРУГОМУ ПОЛУПРОСТРАНСТВУ

Ф.И. Степанов¹

¹Институт проблем механики РАН, Москва
stepanov_ipm@mail.ru

Аннотация. Рассматривается пространственная контактная задача о скольжении системы, состоящей из конечного числа инденторов по вязкоупругому полупространству с постоянной скоростью. Материал полупространства описывается в виде зависимости деформаций от напряжений, определяемой с помощью интегрального оператора Вольтерра и экспоненциального ядра ползучести. Полученный анализ численного решения показал, что взаимное влияние инденторов, а также вязкоупругие свойства материала полупространства являются причиной анизотропии деформационной составляющей силы сопротивления скольжению. В работе представлен анализ сил и моментов сил, действующих на систему инденторов в зависимости от их взаимного расположения, скорости скольжения и других параметров задачи.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации AAAA-A17-117021310379-5)

Введение

Моделирование контакта вязкоупругих тел является важной практической и фундаментальной задачей, поскольку полимерные материалы, обладающие вязкоупругими свойствами, часто используются при конструировании узлов трения, а реология материалов является источником диссипации энергии при контакте, а следовательно, одной из причин возникновения силы трения при скольжении и качении [1-3]. Контакт единичной неровности с вязкоупругой подложкой исследовался в ряде работ [4-6] с помощью метода граничных элементов и функции Грина.

Дискретный контакт твердых тел с периодическим рельефом и вязкоупругой подложкой рассматривался в [7] с использованием численных методов. Свойства подложки описывались моделью Кельвина со спектром времен релаксации и последействия. Другой класс задач рассматривает контакт волнистых поверхностей с вязкоупругой подложкой [8,9]. Моделирование шероховатых поверхностей осуществляется с использованием фракталов [10,11]. Фрактальный подход эффективен для описания реальных шероховатых поверхностей, однако рассматриваемые в указанных работах модели вязкоупругого материала являются существенно упрощенными.

В настоящей работе исследуется скольжение по вязкоупругому полупространству системы, состоящей из конечного числа жестких инденторов. Метод решения основан на подходе, примененном в [6]. В данной работе исследуется взаимное влияние инденторов. Метод решения контактной задачи, предложенный в данной работе, позволяет определять трибологические свойства текстурированных поверхностей. Также в работе представлено конкретный пример взаимного расположения инденторов с целью изучения эффектов анизотропии силы трения, возникающих благодаря реологии материала подложки.

Постановка и метод решения контактной задачи.

Рассматривается установившееся скольжение по вязкоупругому полупространству системы инденторов формы $f_i(x, y)$, $i = 1..n$, где n – их количество. Декартова система координат связана с инденторами и ориентирована таким образом, что ось OX сонаправлена вектору скорости V , а ось OZ направлена в сторону противоположную полупространству. Свойства материала полупространства определяются зависимостью деформаций ($e_{x,y,z}$; $\gamma_{xy,xz,yz}$) от напряжений ($\sigma_{x,y,z}$; $\tau_{xy,xz,yz}$), заданной с помощью оператора Вольтерра. Для сдвиговых деформаций и касательных напряжений она запишется в следующем виде:

$$\gamma_{xy}(t) = \frac{1}{G} \tau_{xy}(t) + \frac{1}{G} \int_{-\infty}^t \tau_{xy}(\tau) K(t-\tau) d\tau, \quad K(t') = \sum_{i=1}^s k_i \exp\left(-\frac{t'}{\lambda_i}\right), \quad (1)$$

где G – модуль сдвига, k_i , λ_i , $i = 1..s$ – времена релаксации и последействия

Условия на поверхности полупространства:

$$z = 0: \quad \tau_{xz}(x, y) = 0, \quad \tau_{yz}(x, y) = 0, \quad \sum_{q=1}^n w_{iq}(x, y) = f_i(x, y) - D_i, \quad (x, y) \in \Omega_i, \quad i = 1..n, \\ \sigma_z(x, y) = 0, \quad \tau_{xz}(x, y) = 0, \quad \tau_{yz}(x, y) = 0, \quad (x, y) \notin \Omega_i, \quad (2) \\ -\infty < x < +\infty, \quad -\infty < y < +\infty,$$

Где D – внедрение индентора, Ω_i – области контакта, $w_{iq}(x, y)$ – смещение границы полупространства под индентором i под действием нагрузки на инденторе q . Условие равновесия системы:

$$Q = \sum_{i=1}^n \iint_{\Omega_i} p(x, y) dx dy, \quad i = 1..n. \quad (3)$$

Система уравнений, составленная из (2) и (3), позволяет в ходе итерационной процедуры [] определить области контакта, распределение контактного давления и внедрение системы. На рис.1. показан пример решения контактной задачи для гексагонального расположения инденторов, характеризуемого расстоянием между инденторами L , а также углом ориентации системы φ , при этом ориентации системы на рис.1 соответствует угол $\varphi=0^\circ$. Цветом обозначена величина контактного давления, а также распределение суммарной нагрузки между инденторами в процентном отношении.

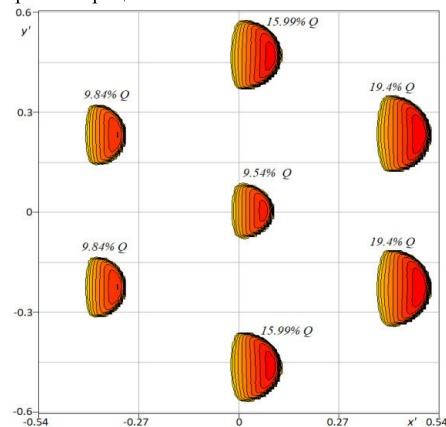


Рис. 1. Распределение контактного давления на поверхности полупространства (система движется направо).

Коэффициент деформационной составляющей силы трения μ^* , а также горизонтальные силы T_i , которые необходимо приложить к инденторам для уравнивания сил сопротивления скольжению, определяются следующими соотношениями:

$$\mu^* = \frac{\left| \sum_{i=1}^n T_i \right|}{\sum_{i=1}^n Q_i}, \quad T_i = - \iint_{\Omega_i} \bar{p}_{xy}(x, y) dx dy, \quad (4)$$

где $\bar{p}_{xy}(x, y)$ – проекция контактного давления на плоскость XY . На рис.2а. представлена зависимость суммарного вращательного момента сил относительно оси симметрии, приложенного к системе в зависимости от ориентации системы, характеризуемой углом φ . На рис.2б представлена зависимость суммарной проекции сил на ось OY , действующих на систему со стороны полупространства от ориентации системы при различных параметрах задачи. Из рис.2 видно, что момент сил, приложенные к системе имеет различный знак в зависимости от ориентации системы. Суммарная проекция сил на ось OY при достаточно небольших расстояниях между инденторами также меняет свой знак в зависимости от ориентации системы, однако при больших расстояниях между инденторами, направление T_y неизменно.

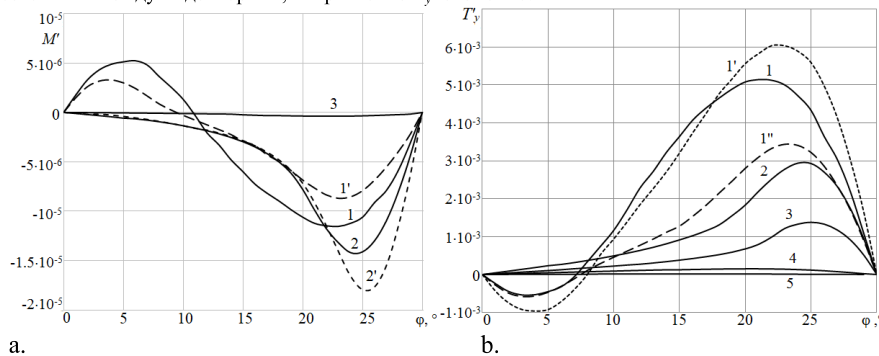


Рис. 2. Распределение контактного давления на поверхности полупространства с указанием доли суммарной нагрузки, приходящейся на каждый индентор. Рис.2а: $V'=10^3$ (кривые 1-3), $V'=2 \cdot 10^3$ (кривая 2'), $V'=10^4$ (кривая 1'), $L'=0.45$ (кривая 1), $L'=0.9$ (кривая 2), $L'=1.35$ (кривая 3). Рис.2б: $V'=10^3$ (кривые 1-5), $V'=2 \cdot 10^3$ (кривые 1', 2'), $V'=10^4$ (кривая 1''), $L'=0.45$ (кривые 1, 1'), $L'=0.9$ (кривые 2, 2'), $L'=1.15$ (кривая 3), $L'=0.45$ (кривая 4).

Заключение.

Анализ численных результатов позволил сделать следующие выводы:

- в случае несимметричного расположения системы инденторов относительно скорости скольжения, возникает анизотропия силы трения, которая приводит к отклонению вектора силы трения от направления скольжения;
- в случае несимметричного расположения инденторов относительно скорости скольжения, силы, действующие на неровности, образуют ненулевой вращательный момент относительно оси симметрии системы;
- вращательный момент может менять направление в зависимости от ориентации системы, расстояния между инденторами, а также скорости скольжения;
- величина вращательного момента и отклонения вектора силы трения от направления скольжения существенно зависят от скорости скольжения, таким образом, что относительно малые и относительно большие значения скорости скольжения соответствуют малым значениям вращательного момента и отклонения силы трения.

Литература

1. Eldredge K.R., Tabor D B.B. The mechanism of rolling friction. I. The plastic range // Proc. Roy. Soc. London ser. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1955. V. 229. N. 1177. P. 181-198.
2. Tabor D. The mechanism of rolling friction. II. The elastic range // Proc. Roy. Soc. London ser. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1955. V. 229. N. 1177. P. 198-220.
3. Greenwood J. A., Tabor D. The friction of hard sliders on lubricated rubber: the importance of deformation losses // Proc. Phys. Soc. 1958. V. 71. N. 6. P. 989
4. Koumi K. E., Chaise T., Nelias D. Rolling contact of a rigid sphere/sliding of a spherical indenter upon a viscoelastic half-space containing an ellipsoidal inhomogeneity // J. Mech. Phys. Sol. 2015. V. 80. P. 1-25.
5. Kusche S. Frictional force between a rotationally symmetric indenter and a viscoelastic half-space // ZAMM J. Appl. Math. Mech. 2016. P. 1-14.
6. Александров В. М., Горячева И. Г., Торская Е. В. Пространственная задача о движении гладкого штампа по вязкоупругому полупространству // Докл. РАН. — 2010 (430). № 4. 490—493.
7. Шептунов Б. В., Горячева И. Г., Ноздрин М. А.. Контактная задача о движении штампа с регулярным рельефом по вязкоупругому основанию // Трение и износ. 2013. Т. 34. №. 2. С. 109—119.
8. Menga N., Putignano C., Carbone G., Demelio G. The sliding contact of a rigid wavy surface with a viscoelastic half-space // Proc. Roy. Soc. A Mathematical Physical and Engineering Sciences. 2014. P. 470.
9. Goryacheva I. G., Makhovskaya Yu. Yu. Sliding of a wavy indenter on a viscoelastic layer surface in the case of adhesion // Mechanics of Solids. 2015. V. 50. N.4 P. 439.
10. Klüppel, M., Heinrich, G., Rubber friction on self-affine road tracks // Rubber Chemistry and Technology. 2000. V. 73, N. 4, P. 578–606.
11. Ciavarella M., Demelio G., Barber J.R., Jang Y.H. Linear elastic contact of the Weierstrass profile // Proc. R. Soc. Lond. 2000 A 456. P. 387–405.