

УДК 539.3

О МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ ПРИ ВИБРАЦИИ

© 2020 г. Академик РАН В. И. Колесников¹, О. А. Беляк^{1,*},
И. В. Колесников¹, Т. В. Суворова¹

Поступило 10.12.2019 г.
После доработки 31.01.2020 г.
Принято к публикации 01.02.2020 г.

Трибологические свойства маслonaполненного композиционного материала изучены на основании решения динамической контактной задачи о вибрации штампа на гетерогенном полупространстве при учете трения в области контакта. Установлена осцилляция силы трения за период колебаний при учете тангенциальных перемещений в области контакта, зависящая от состава композита.

Ключевые слова: динамическая контактная задача, маслonaполненный композит

DOI: 10.31857/S2686740020020133

В последнее время для узлов и деталей триботехнического назначения интенсивно используются маслonaполненные нанокomпозиты, компоненты которых имеют вязкоупругие свойства и свойства вязкой жидкости [1, 2]. При конструировании таких новых композиционных материалов актуальной и практически не исследованной является задача изучения влияния динамических эффектов, возникающих за счет вибрации, на антифрикционные свойства трибосистемы. Для изучения закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния трибосистемы решается динамическая контактная задача при учете трения в области контакта для основания, обладающего микроструктурой. Для описания микроструктуры основания, состоящего из изотропной вязкоупругой матрицы и наполнителя, обладающего свойствами вязкой аморфной жидкости, использованы уравнения гетерогенной среды Био [3], причем модуль Юнга и коэффициент Пуассона были определены экспериментально, в том числе с помощью наноиндентирования. Изменение механических модулей среды при росте пористости изучено с помощью методов микромеханики, конечно-элементных моделей со стохастически распределенными сферическими пора́ми [4]. Отметим, что решение многочисленных задач, моделирующих поверхностные явления в трибологии, приведено в [5]. Динамические контактные задачи для упругих слоистых оснований решены в [6], в том числе в нетрадиционных по-

становках для трибологии [7]. Влияние скорости движения штампа, зависимость контактных напряжений от коэффициента трения для насыщенного пористоупругого основания на основе модели Био–Френкеля изучалось в работе [8], для этого же основания динамическая контактная задача о колебаниях жесткого штампа представлена в работе [9], где в предположении равенства скоростей твердой и жидкой фаз двухфазная среда заменена на эквивалентную однофазную. Прогнозирование упругих свойств композитов с микрокапсулами, наполненными смазкой, основанное на рассмотрении эквивалентной упругой среды, выполнено в работе [2]. Трибологические свойства маслonaполненных композитов экспериментально изучены в работе [10].

В отличие от вышеупомянутых работ здесь представлен новый подход к изучению поверхностного взаимодействия в зоне контакта при учете гетерогенности основания в рамках модели двухфазной среды Био–Френкеля и динамического воздействия. Установлено, что трибологический процесс характеризуют и тангенциальные смещения под штампом. Прочность и износостойкость композита зависит от энергетического воздействия в зоне контакта с трением, при этом необходимо учитывать не только нормальные, но и тангенциальные перемещения в области контакта.

ДИНАМИЧЕСКАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА ПРИ УЧЕТЕ ТРЕНИЯ

Рассматривается контактная задача о колебаниях жесткого штампа с плоским основанием на поверхности гетерогенного полупространства ($|x_1| < \infty$,

¹ Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: o_bels@mail.ru

$x_2 \leq 0$) под действием приложенной к нему силы, изменяющейся по гармоническому закону. В области контакта нормальные и касательные напряжения связаны законом Амонтона–Кулона, $\sigma_{12}^s = \mu \sigma_{22}^s$, где μ – коэффициент трения. Перемещения твердой фазы $\mathbf{u} = \{u_1, u_2\}$ и жидкой фазы $\mathbf{v} = \{v_1, v_2\}$ удовлетворяют уравнениям Био–Френкеля:

$$A \nabla \cdot \nabla \mathbf{u} + 2N \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + Q \nabla \nabla \cdot \mathbf{v} = \rho_{11} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \rho_{12} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} + b \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \right), \quad (1)$$

$$Q \nabla \nabla \cdot \mathbf{u} + R \nabla \nabla \cdot \mathbf{v} = \rho_{12} \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} + \rho_{22} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} - b \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \right),$$

где $A, N, Q, R, \rho_{11}, \rho_{12}, \rho_{22}$ – механические характеристики двухфазной среды, $\Gamma_{ij} = \sigma_{ij}^s + \delta_{ij} \sigma^f$, $i, j = 1, 2$, – полный тензор напряжений, $\sigma_{ij}^s = A e \delta_{ij} + 2N e_{ij} + Q \varepsilon \delta_{ij}$ – тензор напряжений, действующий на вязко-упругий скелет, $\sigma^f = Q e + R \varepsilon$ – давления, действующие на жидкость в порах, e_{ij}, ε_{ij} , $i, j = 1, 2$, – тензоры деформации, соответствующие векторам перемещений твердой фазы $\mathbf{u}$ и жидкой фазы $\mathbf{v}$, $e = \nabla \cdot \mathbf{u}$, $\varepsilon = \nabla \cdot \mathbf{v}$ [3]. При формулировке граничных условий предполагаем, что штамп и граница полупространства непроницаемы для жидкой фазы. Считаем, что режим колебаний установившийся, при этом отделим временной множитель и изложение будем вести для безразмерных амплитудных значений соответствующих функций, при этом линейные размеры отнесены к полуширине штампа, а напряжения – к модулю сдвига N . Граничные условия при этом имеют вид

$$u_2(x_1, 0) = v_2(x_1, 0), \quad |x_1| < \infty, \quad \sigma_{12}(x_1, 0) = \sigma_{22}(x_1, 0) = 0, \quad |x_1| > 1, \quad (2)$$

$$\sigma_{12}^s(x_1, 0) = \mu \sigma_{22}^s(x_1, 0), \quad u_2(x_1, 0) = \delta, \quad |x_1| \leq 1,$$

где δ – осадка штампа. Будем разыскивать контактные давления $q(x_1) = \Gamma_{22}(x_1, 0)$ и тангенциальные смещения $u_1(x_1, 0)$ под штампом при учете трения в области контакта. В результате применения к определяющим уравнениям (1) и граничным условиям (2) преобразования Фурье и удовлетворения граничных условий, решение задачи сводится к решению интегрального уравнения с разностным ядром:

$$\int_{-1}^1 k(x_1 - \xi) q(\xi) d\xi = \delta, \quad (3)$$

$$k(x_1 - \xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma} (\mu K_{21}(\alpha) + K_{22}(\alpha)) e^{i\alpha(x_1 - \xi)} d\alpha.$$

Мероморфные функции в комплексной плоскости $K_{ij}(\alpha)$, $i, j = 1, 2$, являются элементами матрицы Грина для гетерогенного основания и на бесконечности имеют поведение $\lim_{\alpha \rightarrow \infty} K_{ii}(\alpha) = \frac{d_{ii}}{|\alpha|}$,

$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} K_{ij}(\alpha) = (-1)^i \frac{d_{ij}}{\alpha}$, $i \neq j$. Выделим в (3) логарифмическую особенность:

$$k(x_1 - \xi) = I_1(x_1 - \xi) + \frac{K_0(R|x_1 - \xi|)}{\pi},$$

$$I_1(x_1 - \xi) = \frac{1}{2\pi} \int_{\gamma} L(\alpha) e^{i\alpha(x_1 - \xi)} d\alpha, \quad (4)$$

$$L(\alpha) = \mu K_{21}(\alpha) + K_{22}(\alpha) - \frac{d_{22}}{\sqrt{\alpha^2 + R^2}},$$

где $K_0(z)$ – функция Макдональда нулевого порядка. Интеграл $I_1(x_1 - \xi)$ в (4) является быстро сходящимся. Выбор $R \gg 1$ минимизирует вклад интегралов по разрезам $iR \leq \alpha < i\infty$, $-iR \geq \alpha > -i\infty$ [9]. После дискретизации области контакта равномерно распределенными точками коллокации x_{1i}, ξ_{1i} , $i = 1, \dots, N$, решение интегрального уравнения сводится к определению $q_n = q(x_{1n})$, $x_{1n} < x_1 < x_{1n+1}$ из системы линейных уравнений N порядка, быстро сходящейся и обладающей квазидиагональной матрицей:

$$\sum_{m=1}^N r_{mn} q_n = \frac{\delta}{h}, \quad n = 1, 2, \dots, N,$$

$$r_{mn} = I_1(x_{1m} - \xi_n) + d_0(\text{erf}(z_2) - \text{erf}(z_1)), \quad m \neq n,$$

$$d_0 = \frac{d_{22} \text{sign}(x_{1m} - \xi_n)}{h},$$

$$z_1 = \sqrt{(x_{1m} - \xi_n)R}, \quad z_2 = \sqrt{(x_{1m+1} - \xi_n)R},$$

$$r_{nn} = I_1(x_{1n} - \xi_n) + \frac{2d_{22} \text{erf}(\sqrt{hR}/2)}{h},$$

где $\text{erf}(z)$ – интеграл вероятности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Результаты расчетов приведены для композиционного материала с матрицей на основе фенилона, модифицированного нанодобавкой (алюмомагнетитовая шпинель) и наполнителем в виде цилиндрического масла [4, 10]. На рис. 1 приведены графики тангенциальных смещений под штампом при различных коэффициентах трения: $\mu = 0$, $\mu = 0.1$, $\mu = 0.2$, $\mu = 0.3$.

Установлено, что зависимость нормальных и касательных контактных напряжений от пористости гетерогенного основания носит нелинейный характер, это иллюстрирует рис. 2, на кото-

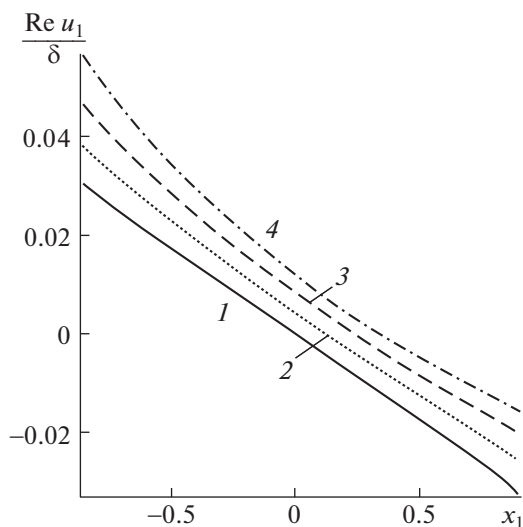


Рис. 1. Тангенциальные перемещения под штампом при различных коэффициентах трения: $\mu = 0$ (1), $\mu = 0.1$ (2), $\mu = 0.2$ (3), $\mu = 0.3$ (4).

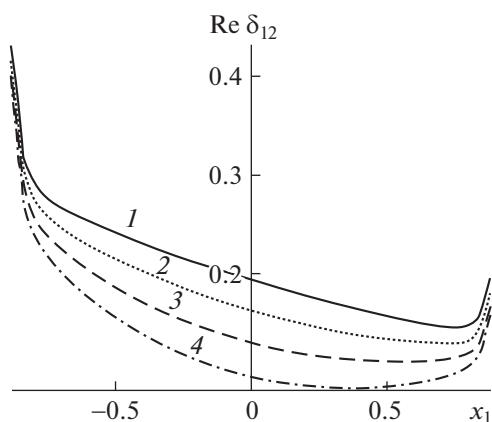


Рис. 3. Влияние частоты вибраций штампа на распределение касательных контактных напряжений (действительная часть): $\omega = 20$ Гц (1), $\omega = 80$ Гц (2), $\omega = 180$ Гц (3), $\omega = 260$ Гц (4).

ром представлены графики модуля касательных контактных напряжений при различной пористости m гетерогенного основания: $m = 0.05$, $m = 0.1$, $m = 0.15$, $m = 0.2$.

Экспериментально показано [11], что при возрастании частоты колебаний контактные напряжения уменьшаются, результаты численного анализа в настоящей работе также подтверждают этот факт. На рис. 3 приведены графики действительной части касательных напряжений в зависимости от частоты колебаний штампа: $\omega = 20$ Гц, $\omega = 80$ Гц, $\omega = 180$ Гц, $\omega = 260$ Гц.

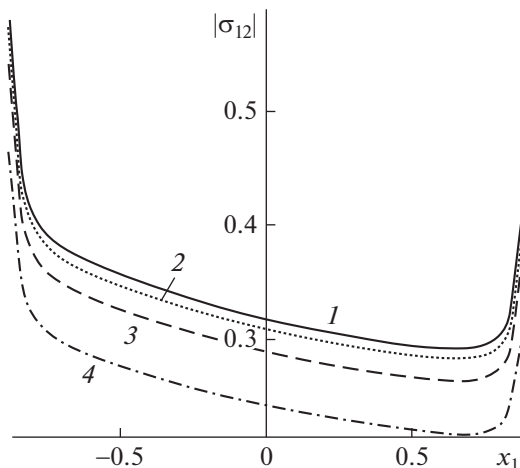


Рис. 2. Влияние пористости гетерогенного основания на распределение касательных контактных напряжений: $m = 0.05$ (1), $m = 0.1$ (2), $m = 0.15$ (3), $m = 0.2$ (4).

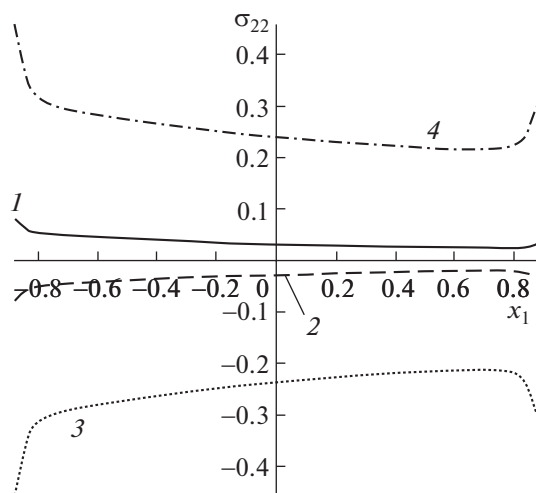


Рис. 4. Изменение касательных контактных напряжений в течение периода колебаний T : $t = 0$ (1), $t = \frac{T}{4}$ (2), $t = \frac{T}{2}$ (3), $t = \frac{3T}{4}$ (4).

Учет коэффициента трения, как в статическом [5], так и в квазистатическом случае [8], приводит к асимметрии напряжений под штампом. Изменение амплитуды силы трения за период колебаний играет ключевую роль. Износостойкость композита зависит от энергетического воздействия в зоне трения, при этом необходимо учитывать не только нормальные, но и тангенциальные перемещения в области контакта. Хотя увеличение частоты колебаний и приводит к уменьшению контактных напряжений на единицу времени, но при этом большая энергия генерируется в области контакта. На рис. 4 приведены графики изменения касательных контактных напряжений за период T при

колебаниях штампа под действием силы $P = P_0 \cos \omega t$ для значений $\omega = 50$ Гц, $m = 0.2$: $t = 0$, $t = \frac{T}{4}$, $t = \frac{T}{2}$, $t = \frac{3T}{4}$. Сила трения за период колебаний изменяет знак, а ее амплитуда описывает плоскую фигуру, площадь которой пропорциональна энергии воздействия силы трения. На основании этого положения можно прогнозировать износостойкость композита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контактные напряжения и тангенциальные перемещения под штампом для гетерогенного основания зависят не только от коэффициента трения в области контакта, но и существенным образом зависят от частоты колебаний, пористости и флюидонасыщенности среды. При вибрации изменение коэффициента трения имеет значительно большее влияние на контактные напряжения, чем в квазистатической задаче при движении штампа [8]. На основании численного анализа можно оценить энергетическое воздействие за период колебаний, от которого зависит износостойкость композиционного материала. При этом необходимо учитывать не только нормальные, но и тангенциальные перемещения в области контакта. Проведенные исследования позволяют найти оптимальное соотношение механических свойств композитного материала, работающего в условиях динамического нагружения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы” при финансовой поддержке государства в лице Министерства науки и высшего образования России (идентификатор проекта RFMEFI60718X0203).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгополов К.Н., Колесников И.В., Мельников Э.Л. Применение антифрикционных полимерных самосмазывающихся материалов класса “Маслянисты” в узлах трения скольжения // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2018. № 4. С. 23–26.
2. Kolesnikov I.V., Bardushkin V.V., Myasnikov Ph.V. Calculation of Stress-Deformed Condition in Polymer Nanocomposites Filled with Microcapsules with Lubricant // J. Theoretical and Applied Mechanics. 2017. V. 47. № 4. P. 37–47.
3. Био М.А. Механика деформирования и распространения акустических волн в пористой среде // Период. сб. переводов иностр. статей. 1963. № 82. Вып. 6. С. 103–134.
4. Ивановкин П.Г., Суворова Т.В., Данильченко С.А. и др. Комплексное исследование полимерных композитов с матрицей на основе фенилона C-2 // Вестн. РГУПС. 2018. Вып. 4. С. 54–62.
5. Горячева И.Г., Маховская, Ю.Ю., Морозов А.В. и др. Трение эластомеров. М.: ИПМ; 2017.
6. Бабешко В.А. Обобщенный метод факторизации в пространственных динамических смешанных задачах теории упругости. М.: Наука; 1984.
7. Бабешко В.А., Евдокимова О.В., Бабешко О.М. Блочные элементы в контактных задачах с переменным коэффициентом трения // ДАН. 2018. Т. 480. № 5. С. 537–541.
8. Беляк О.А., Суворова Т.В. Влияние микроструктуры основания на силы трения при движении плоского штампа // Экологич. вестн. научн. центров Черноморского экономического сотрудничества. 2018. № 3. С. 25–31.
9. Беляк О.А., Суворова Т.В. Учет трения в области контакта при колебаниях жесткого штампа на поверхности полугораниченной среды // Экологич. вестн. научн. центров Черноморского экономического сотрудничества. 2019. Т. 16. № 3. С. 33–39.
10. Колесников В.И., Мясникова Н.А., Мясников Ф.В., Мантуров Д.С., Новиков Е.С., Данильченко С.А., Авилов В.В. Трибологические и физико-механические свойства маслonaполненных композитов на основе фенилона // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 5. С. 462–470.
11. Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. М.: Физматлит; 2013.

ABOUT MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTIVE THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF OIL-FILLED COMPOSITES UNDER VIBRATION

Academician of the RAS V. I. Kolesnikov^a, O. A. Belyak^a, I. V. Kolesnikov^a, and T. V. Suvorova^a

^a Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

The tribological properties of the oil-filled composite material are studied. The dynamic contact problem of the vibration of a rigid punch on a heterogeneous half-space is solved taking into account the friction process in the contact area. The oscillation of the friction force during the period of vibration, taking into account tangential displacements in the contact area depending on the compound of the composite is established.

Keywords: dynamic contact problem, oil-filled composite