

ИНДЕНТИРОВАНИЕ ВЯЗКОУПРУГОГО СЛОЯ С УЧЕТОМ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

А.Н. Любичева¹

¹ИИМех РАН, Москва, Россия.
E-mail: lyubicheva@mail.ru

В работе проведено моделирование внедрения и последующего отвода жесткого индентора от поверхности вязкоупругого слоя с учетом влияния сил межмолекулярного притяжения, которые действуют между телами. Контактная задача рассмотрена в осесимметричной постановке, скорость перемещения индентора постоянна. Молекулярное взаимодействие поверхностей определяется силами Ван-дер-Ваальса и описывается моделью Можи-Дагдейла, которая, в отличие от классических упрощенных теорий учитывает адгезионные напряжения вне области контакта и их влияние на контактные давления. В модели Можи-Дагдейла потенциал адгезионного взаимодействия аппроксимируется ступенчатой функцией. Исследование ведется в рамках линейной теории вязкоупругости, свойства вязкоупругого слоя описываются моделью Кельвина-Фойгта. В результате решения получены соотношения для зависимости нагрузки на индентор от времени, даны выражения для определения неизвестной границы области контакта в процессе нагружения и разгрузки индентора, анализируется площадь петли гистерезиса при разных значениях времени релаксации материала. Выбранная постановка позволяет оценить взаимное влияние несовершенной упругости материала и молекулярной адгезии контактирующих тел на рост величины области контакта и нагрузки на штамп при индентировании в зависимости от времени.

Контактное взаимодействие осесимметричного индентора с упругим полупространством при наличии адгезии различной природы рассмотрены в работах [1, 2]. Настоящая работа продолжает исследование [3], где не учитывается адгезионное притяжение на поверхности контактирующих тел.

Постановка задачи. На рисунке 1(а) представлена схема контакта индентора радиуса R и тонкого вязкоупругого слоя толщины h , лежащего на жестком основании. Площадка контакта является кругом неизвестного радиуса $a(t)$. Принято, что в начальный момент времени вершина штампа находится на расстоянии δ_0 от поверхности слоя, на которой расположено начало координат цилиндрической системы $O r \varphi z$, ось z направлена вниз. Индентор квазистатически перемещается вниз с постоянной скоростью V , а затем с той же скоростью движется вверх, осадка индентора $\delta(t)$ кусочно-линейно зависит от времени.

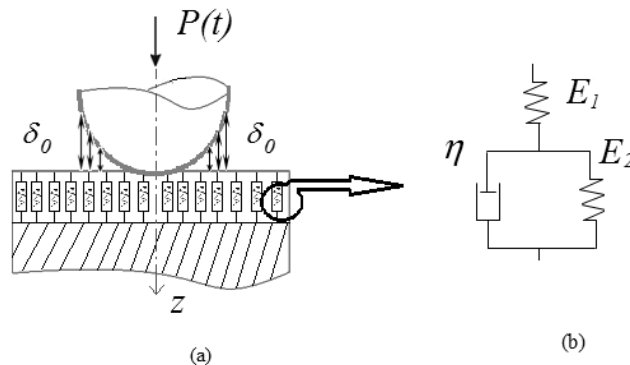


Рисунок 1. Схема контакта индентора и слоя (а); механическая модель материала слоя (б).

Для учета адгезионного притяжения поверхностей вне области контакта $a(t)$, но внутри области межмолекулярного взаимодействия с границей $b(t)$, задается отрицательное давление $-p$:

$$p_a(\delta(t)) = \begin{cases} -p_0, & 0 \leq \delta(t) \leq \delta_0 \\ 0, & \delta(t) > \delta_0 \end{cases},$$

где δ_0 расстояние между поверхностями, при котором они начинают испытывать взаимное притяжение.

Модель материала. Материал слоя является изотропным однородным линейно вязкоупругим, для его моделирования использованы модели Винклера и Кельвина-Фойгта (Рис. 1(б)). Контактное давление $p(r, t)$ и вертикальные перемещения границы слоя $u_z(r, t)$ связаны между собой дифференциальным соотношением следующего вида:

$$T_\sigma \frac{dp(r, t)}{dt} + p(r, t) = \frac{E}{h(1-\nu^2)} \left(u_z(r, t) + T_\epsilon \frac{du_z(r, t)}{dt} \right),$$

здесь ν - коэффициент Пуассона, модуль упругости E , и времена последействия T_ϵ и релаксации T_σ .

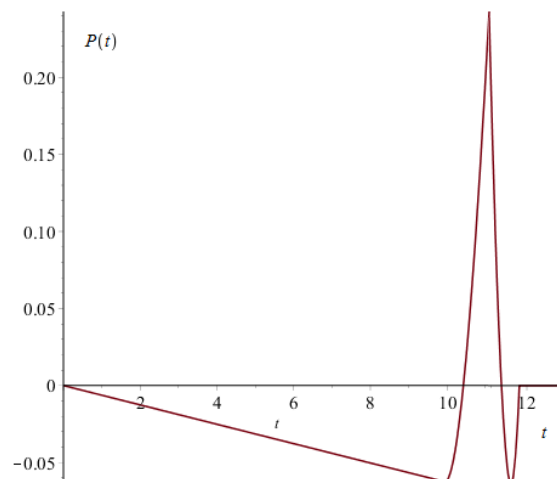


Рисунок 2. Зависимость нагрузки на индентор от времени (в безразмерных переменных).

На рисунке 2 приведен график зависимости нагрузки на индентор от времени в цикле ее возрастания и убывания для следующих параметров расчета: $h/R=10^{-6}$, $(1-\nu^2)p_0/E=10$, $T_d/T_\sigma=10$, $VT_d/R=10^{-4}$, $\delta_0/R=10^{-3}$.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310379-5), а также при финансовой поддержке РФФИ, проект № 17-01-00352.

Литература

1. Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю. Адгезионное взаимодействие упругих тел // Прикладная математика и механика. 2001. Т. 65. № 2. С. 279-279.
2. Маховская Ю.Ю. Моделирование взаимодействия индентора с упругим полупространством при наличии адгезионного притяжения произвольного вида // Трение и износ. 2016. Т. 37. № 4. С. 393-400.
3. Любичева А.Н. Аналитическое решение осесимметричной контактной задачи для вязкоупругого основания в цикле возрастания и убывания нагрузки на индентор // Трение и износ. 2017. Т. 38. №2. С. 129-135.

MODELLING OF A VISCOELASTIC LAYER INDENTATION TAKING INTO ACCOUNT ADHESION BETWEEN THE INTERACTING SURFACES

A.N. Lyubicheva

¹*IPMech of the RAS, Moscow, Russia.
E-mail: lyubicheva@mail.ru*

The simulation of the indentation and subsequent removal of a rigid indenter from the surface of a viscoelastic layer was carried out, taking into account the influence of intermolecular attraction that act between the bodies. The contact problem is considered in an axisymmetric 2D formulation, the velocity of the indenter is constant. The molecular interaction between the surfaces is determined by the Van der Waals forces and is described by the Maugis-Dugdale model, which, in contrast to the classical simplified theories, takes into account the adhesive stresses outside the contact region and their influence on contact pressure. In the Maugis-Dugdale model, the potential of the adhesion interaction is approximated by a step function. The investigation is carried out within the framework of the linear theory of viscoelasticity; the properties of the viscoelastic layer are described by the Kelvin-Voigt model. As results of the problem solution the curve of a load depending on time in the process of loading and unloading the indenter is obtained, the boundary of the contact area evaluated, the area of the hysteresis loop is analyzed for different values of the material relaxation time. The chosen setting allows one to assess the mutual influence of underage material and molecular adhesion as a function of time.