

УДК 691.175.5/8

Е. М. КУЛИКОВ, Д. А. ЧЕРНОУС

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Решена задача о соударении жесткого индентора с тонким вязкоупругим покрытием. Рассматривался индентор с плоской контактной поверхностью. При решении контактной задачи использована гипотеза Винклера. Полученные зависимости использованы для прогноза эластичности по отскоку для покрытий из эластичных полимерных материалов. Установлены зависимости эластичности по отскоку от механических характеристик материала покрытия и толщины покрытия.

Введение. Одной из областей практического использования полимерных материалов является производство защитных покрытий, наносимых на различные детали и элементы конструкций. Данные покрытия могут выполнять самые разнообразные функции. В частности, нанесение на ответственные узлы механизмов покрытий из эластичного полимера позволяет защитить его от ударных нагрузок при транспортировке и эксплуатации. Использование эластичных полимеров в ударозащитных покрытиях обусловлено тем, что эти материалы допускают большие обратимые (не сопровождающиеся разрушением или пластическим течением) деформации.

Эффективность защиты от ударных нагрузок определяется демпфирующей способностью материала покрытия, т. е. способностью переводить часть энергии деформирования во внутреннюю энергию при условии сохранения обратимых деформаций. Данный переход энергии обусловлен внутренним трением в материале и может быть описан на основе известных соотношений вязкоупругости [1]. Для оценки демпфирующей способности материала используется техническая характеристика \mathcal{E} , называемая эластичностью по отскоку. Величина \mathcal{E} определяется как выраженное в процентах отношение кинетической энергии стального индентора после соударения с исследуемым покрытием $T_{\text{отс}}$ к начальной кинетической энергии индентора T_0 [2]:

$$\mathcal{E} = \frac{T_{\text{отс}}}{T_0} \cdot 100 \% = \left(\frac{v_{\text{отс}}}{v_0} \right)^2 \cdot 100 \% , \quad (1)$$

где $v_{\text{отс}}$ – скорость отскока индентора; v_0 – начальная скорость индентора (скорость полета).

Чем ниже величина эластичности \mathcal{E} , тем большая часть кинетической энергии поглощается покрытием.

При проведении эксперимента по определению эластичности \mathcal{E} толщина испытуемого образца материала, радиус и начальная скорость индентора должны в точности соответствовать требованиям ГОСТа [2]. Изменение радиуса индентора или толщины образца приводят к существенному изменению измеряемого значения эластичности по отскоку. Следовательно, величина \mathcal{E} не может рассматриваться как независимая механическая характеристика материала. В связи с этим представляется актуальной задача установить зависимость эластичности \mathcal{E} от таких вязкоупругих свойств материала, как модуль Юнга E и ядро релаксации $R(t)$. Общеизвестно [1], что модуль E и ядро $R(t)$ не зависят от размеров испытуемого образца и параметров процесса испытания. Кроме того, для повышения информативности результатов измерения эластичности \mathcal{E} необходимо установить характер и степень влияния параметров нагружения покрытия в процессе испытания на результат измерения (эластичность \mathcal{E}).

Таким образом, целью настоящей работы является построение методики расчета эластичности по отскоку как функции вязкоупругих свойств материала покрытия и параметров процесса испытания (массы и начальной скорости индентора, толщины покрытия).

Описание расчетной методики. Процесс испытания полимерного покрытия с целью определения эластичности по отскоку материала этого покрытия заключается в следующем:

- в тонкое покрытие толщиной h , нанесенное на абсолютно жесткое основание, внедряется жесткий индентор массой m с начальной скоростью v_0 ;
- измеряется скорость индентора $v_{отс}$ при его отскоке от покрытия и вычисляется эластичность по формуле (1).

Схематично процесс испытания на эластичность по отскоку представлен на рисунке 1. Индентор прикреплен к невесомому стержню, который может вращаться без сопротивления вокруг оси. Реакция \vec{R} в данном кривошипе при внедрении индентора в покрытие уравнивает силу тяжести индентора \vec{G} . По углу отклонения кривошипа после отскока индентора определяется скорость $v_{отс}$. Кроме силы тяжести и реакции стержня на индентор при его внедрении в покрытие действует сила сопротивления со стороны покрытия \vec{F} . Сила F определяется как интеграл по площади области контакта от нормального контактного давления p . Давление p по модулю совпадает с осевой компонентой тензора напряжений σ_{xx} на контактной поверхности. При этом ось x перпендикулярна поверхности:

$$F = \iint_S p \, dS = - \iint_S \sigma_{xx} \, dS . \quad (2)$$

В равенстве (2) учтено, что при внедрении индентора в покрытие возникает сжимающее (а значит — отрицательное) напряжение σ_{xx} .

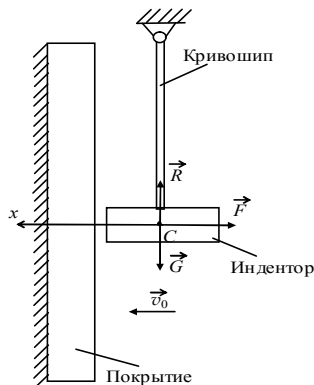


Рисунок 1 — Схема испытания при определении эластичности по отскоку

Для получения расчетной оценки эластичности примем ряд упрощений, которые позволят аналитически решить контактную задачу об ударе индентора и определить скорость отскока при известных вязкоупругих свойствах материала покрытия и заданных параметрах h , m , v_0 .

Во-первых, будем рассматривать индентор с плоской контактной поверхностью. При этом площадь области контакта не зависит от внедрения индентора и не изменяется со временем. Кроме того, для такого индентора внедрение всех точек $u(t)$ одинаково. Если за начало отсчета выбрать положение центра масс индентора (точка C на рисунке 1) в момент соприкосновения с покрытием, то внедрение $u(t)$ будет совпадать с координатой x центра масс. Тогда формулировку теоремы о движении центра масс механической системы применительно к рассматриваемому индентору можно записать так:

$$F = -ma_C = -m\dot{u}, \quad (3)$$

где a_C — ускорение центра масс индентора. Точка над символом обозначает производную по времени от соответствующей величины.

Во-вторых, будем рассматривать тонкое покрытие, для которого толщина h сопоставима с размерами площади контакта. Как было показано в работах [3, 4], для таких покрытий можно использовать гипотезу Винклера. Данная гипотеза формулируется следующим образом: контактное давление, распределенное в окрестности некоторой точки контактной поверхности, определяется смещением только данной точки и не зависит от внедрения других точек поверхности. Использование данной гипотезы позволяет при решении контактной задачи рассматривать деформирование только той части покрытия, которая лежит непосредственно под областью контакта. В соответствии с результатами работы [3] можно считать, что рассматриваемая часть покрытия находится в одноосном напряженном состоянии. То есть, отличной от

нуля является только одна компонента тензора напряжений σ_{xx} . С учетом первого сделанного нами упрощения (внедрения всех точек контактной поверхности одинаковы) данная компонента тензора напряжений одинакова по всей области контакта. Следовательно, выражение (2) примет вид: $F = -\sigma_{xx}S$, где S – площадь поперечного сечения индентора. С учетом динамического уравнения (3) для компоненты σ_{xx} можно записать:

$$\sigma_{xx} = \frac{m}{S} \ddot{u}. \quad (4)$$

В-третьих, пренебрежем изменением напряжения и деформации по толщине покрытия. При этом не учитывается инертность материала покрытия (плотность принимается равной нулю). Данное допущение позволяет выразить осевую компоненту тензора деформаций ϵ_{xx} через внедрение u :

$$\epsilon_{xx} = -\frac{u}{h}. \quad (5)$$

С учетом сделанных упрощений для определения скорости отскока индентора достаточно подставить выражения (4) и (5) в физические уравнения, определяющие связь компонент тензора напряжения и деформации.

Согласно наиболее распространенной модели механического поведения вязкоупругого полимерного материала [5] связь осевого напряжения с соответствующей компонентой тензора деформации при одноосном напряженном состоянии формулируется в виде дифференциального уравнения

$$\dot{\sigma}_{xx} + \frac{1}{\tau} \sigma_{xx} = E \dot{\epsilon}_{xx} + \frac{H}{\tau} \epsilon_{xx}, \quad (6)$$

где E , H , τ – вязкоупругие характеристики материала. Величины E и H называют мгновенным и длительным модулем упругости материала соответственно, величину τ – временем релаксации. В таблице 1 приведены значения вязкоупругих характеристик некоторых эластичных материалов.

Таблица 1 – Вязкоупругие характеристики полимерных материалов

Материал	E , МПа	H , МПа	τ , мс	Источник информации
Протекторная резина	56	25	0,6	[6]
Эластичный полиуретан	47	37	0,9	[7]
Фторопласт	400	160	0,7	[5]

После подстановки выражений (4) и (5) в физическое уравнение (6) получим дифференциальное уравнение для внедрения $u(t)$

$$\ddot{u} + \frac{1}{\tau} \dot{u} + \frac{ES}{hm} \dot{u} + \frac{HS}{\tau hm} u = 0. \quad (7)$$

Решение данного дифференциального уравнения имеет вид

$$u(t) = Ce^{rt} = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + C_3 e^{r_3 t} . \quad (8)$$

где r_1, r_2, r_3 – корни характеристического уравнения

$$r^3 + \frac{1}{\tau} r^2 + \frac{ES}{hm} r + \frac{HS}{\tau hm} = 0 .$$

Константы C_1, C_2, C_3 определяются из начальных условий:

$$u(0) = 0; \quad \dot{u}(0) = v_0; \quad \ddot{u}(0) = 0 .$$

Третье условие является следствием того, что в момент касания индентора с покрытием сила F отсутствует ($F(0) = 0$). Используя полученную зависимость внедрения индентора от времени (8), можно определить время удара $t_{уд}$. Значение $t_{уд}$ равно промежутку времени, через который индентор отделится от покрытия. При этом сила, действующая на индентор со стороны покрытия, вновь будет равна нулю. Значит, время $t_{уд}$ определяется из условия

$$\ddot{u}(t_{уд}) = 0 . \quad (9)$$

Скорость $v_{отс}$ – это скорость индентора в момент времени $t = t_{уд}$:

$$v_{отс} = \dot{u}(t_{уд}) . \quad (10)$$

Таким образом, для получения расчетной оценки эластичности по отскоку необходимо установить зависимость внедрения от времени (8), определить время удара (9) и скорость отскока (10). Тогда значение эластичности \mathcal{E} определяется по формуле (1).

Результаты расчетов. Описанная методика расчета была реализована в программной среде MathCAD. Значения исходных параметров для расчетов были выбраны в соответствии с ГОСТом [2]: $m = 0,25$ кг; $v_0 = 2$ м/с; $S = 1,8 \cdot 10^{-4}$ м².

Значение толщины покрытия h варьировалось от 2 до 15 мм. Требуемая по ГОСТу толщина составляет 12 мм. Установленные расчетные зависимости эластичности по отскоку от толщины покрытия для трех полимерных материалов представлены на рисунке 2. Анализ данных зависимостей позволяет отметить следующее:

- увеличение толщины покрытия приводит к уменьшению эластичности \mathcal{E} ;
- покрытие из эластичного полиуретана характеризуется значительно (более чем в 1,5 раза) большей эластичностью по сравнению с покрытиями из резины или фторопласта;
- для покрытий толщиной $h > 6$ мм фторопласт позволяет реализовать меньшую эластичность, чем резина;

– при изменении толщины покрытия от 8 до 15 мм эластичность \mathcal{E} резинового покрытия уменьшается только на 5 %, что позволяет говорить о стабильности эластичности по отскоку у резиновых покрытий.

Расчеты эластичности \mathcal{E} , проведенные для различных начальных скоростей в диапазоне от 0,2 до 20 м/с, свидетельствуют о практической независимости эластичности по отскоку для рассматриваемых материалов от параметра v_0 .

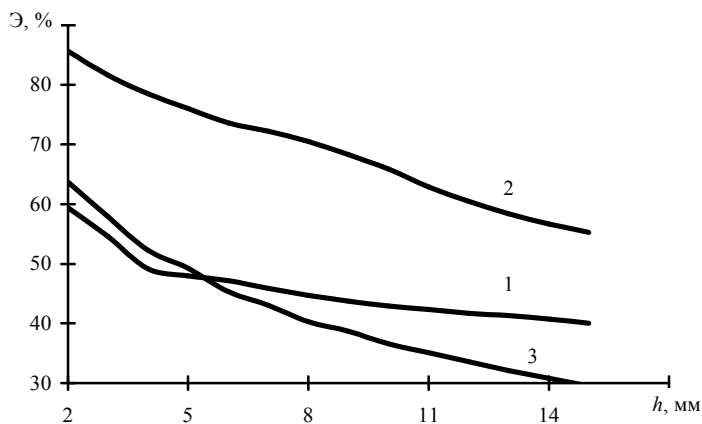


Рисунок 2 – Зависимость эластичности по отскоку от толщины покрытия:
1 – для резины; 2 – для полиуретана; 3 – для фторопласта

Заключение. В результате использования разработанной методики расчета эластичности по отскоку установлено, что увеличение толщины покрытия приводит к уменьшению эластичности. Данное уменьшение нелинейно и зависит от вязкоупругих свойств материала покрытия. Из трех рассмотренных полимерных материалов протекторная резина обеспечивает наиболее стабильное значение эластичности по отскоку покрытия, лежащее в диапазоне от 43 до 40 % (при изменении толщины покрытия от 8 до 15 мм).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Уорд, И. Механические свойства твердых полимеров / И. Уорд – М.: «Химия», 1975. – 350 с.
- 2 ГОСТ 27110-86. Резина. Метод определения эластичности по отскоку на приборе типа Шоба. – Введ. 1987-07-01.– М.: Изд-во стандартов, 1987. – 4 с.
- 3 Можаровский, В. В. Прикладная механика слоистых тел из композитов: плоские контактные задачи / В. В. Можаровский, В. Е. Старжинский. – Минск: Наука и техника, 1988. – 271 с.

4 Шилько, С. В. Оценка контактной жесткости локальных покрытий: сопоставление расчетных методов. Ч. 1 / С. В. Шилько, Е. М. Петроковец, Т. В. Семенова // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 2. – С. 128–133.

5 Захариев, Г. О реологической модели полимеров и стеклопластиков / Г. Захариев, Л. Хаджиков, П. Маринов // Механика полимеров. – 1971. – № 5. – С. 851–857.

6 Рудницкий, В. А. Оценка свойств эластомерных материалов при постоянной скорости индентирования / В. А. Рудницкий, А. П. Крень, С. В. Шилько // Трение и износ. – 2001. – Т. 22, № 5. – С. 502–509.

7 Мацкевич, А. В. Анализ простого последствия и релаксации напряжений в термопластах по теории линейной наследственности / А. В. Мацкевич // Механика стержневых систем и сплошных сред: межвузовский тематический сб. тр. – Л.: ЛИСИ, 1979. – С. 48–51.

Получено 12.06.2006

**ISBN 978-985-468-276-1. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 1. Гомель, 2007**

УДК 629.4.023:621.6.04

А. В. ПУТЯТО, В. В. БЕЛОГУБ

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ НАГРУЖЕННОСТИ КУЗОВОВ ВАГОНОВ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ¹

Выполнен анализ расчетных схем при определении прочностных характеристик стен кузовов вагонов в случае перевозки сыпучих грузов. Выделены основные подходы в моделировании сыпучих (гранулированных) сред, дальнейшее развитие и применение которых позволит определять уточненные прочностные характеристики элементов конструкций грузового подвижного состава.

В соответствии с нормативными требованиями вагоностроения при проектировании или модернизации вагонов необходимо производить оценку прочности торцовых и боковых стен, дверей от нагрузок, вызванных действием сыпучего груза.

Одной из основополагающих работ в области статики сыпучего материала является работа [19], где проведены экспериментальные исследования и получено выражение для определения давления внутри силоса, которое не зависит от физико-механических свойств сыпучего материала. Использование полученного выражения требует проведения дополнительных экспериментов

¹) Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского Фонда фундаментальных исследований (проекты T07M-008).