

ЭЛАСТОПЛАСТЫ: МОДЕЛИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ В ДЕМПФИРУЮЩИХ СИСТЕМАХ

Шилько С.В.

*ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого»
НАН Беларуси, Гомель*

Введение. Эластопласты на основе высокомолекулярных соединений (полимеров и эластомеров), сочетающие высокую вязкость с низкими значениями модуля упругости и предела текучести, широко используются в демпфирующих системах, позволяя получить требуемое сочетание податливости и диссипативных характеристик при высокой технологичности переработки в изделия, включая возможность их рециклинга после исчерпания ресурса.

Рассуждая в духе работ [1,2], заметим, что передовые материаловедческие решения в этой области возможны при анализе механических свойств биотканей, выполняющих амортизирующую функцию. Так, например, высокая демпфирующая способность межпозвоночного диска обусловлена сочетанием упругого фиброзного кольца и квазижидкого вязкого ядра. Сустав хорошо амортизирует динамические нагрузки благодаря эластичности пористого хряща и вязкому сопротивлению при выдавливании через поры хрящевого матрикса т.н. синовиальной жидкости, существование предела текучести которой обусловлено жидкокристаллической структурой. Периодонтальная связка зубочелюстной системы, образованная прочными упругими коллагеновыми волокнами и достаточно вязкой соединительной тканью, эффективно демпфирует разнонаправленные жевательные нагрузки на зубы.

Эластопласты, являясь синтетическими аналогами указанных реологически сложных биоматериалов, в той или иной степени проявляют упругие, вязкие и пластические свойства. Ниже рассматриваются соответствующие механико-математические модели эластопластов, пригодные для использования в расчетах различных амортизирующих устройств, общие схемы которых показаны на рисунок 1.

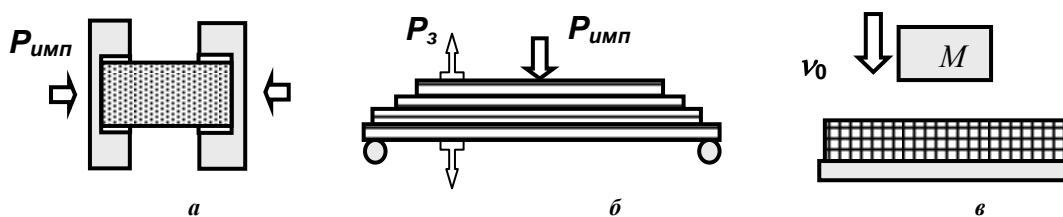


Рисунок 1. – Амортизация при сжатии (а), изгибе (б) и контактном индентировании (в)

1. Модели упругого деформирования эластопластов достаточно просты и применимы в качестве первого приближения для анализа процесса демпфирования импульсной нагрузки $P_{имп}$ в условиях сжатия (рисунок 1а) и изгиба (рисунок 1б), а также ударного воздействия индентора массой M , движущегося с начальной скоростью v_0 (рисунок 1в). Однако, даже в случае идеально упругого материала указанных демпфирующих элементов, часть энергии рассеивается в зонах проскальзывания при внешнем трении. Диссипация растет при увеличении площади контактной поверхности и коэффициента трения, давлений и амплитуды проскальзывания в контакте, что достигается, например, применением работающей на изгиб многолистовой рессоры с предварительной затяжкой (рисунок 1б). Такие амортизаторы показали свою эффективность в ортопедии при изготовлении пластинчатого протеза стопы и в транспортном машиностроении.

Анализ упругих направленно-армированных эластопластов усложняется их выраженной анизотропией. В качестве примера была построена конечноэлементная модель пакета листов из ортотропного материала с упругими константами E_x, E_y, ν_x, ν_y , нагруженного сосредоточенной силой в центре и усилием затяжки с шарнирным закреплением в опорах (рисунок 1б). При постоянном поперечном модуле упругости $E_y = 10$ ГПа отношение E_x/E_y материала листа изменялось в пределах от 1 до 10, т.е. рассматривался переход от изотропного материала ($E_x = E_y$) к однонаправленному композиту. Коэффициенты Пуассона ν_x, ν_y изменялись от 0,4 (для $E_y = E_x$) до 0,25 (для $E_y = 10E_x$), что приближенно учитывало повышение объемного содержания армирующего стекловолокна ($\nu_{\text{стекла}} \approx 0,2$). Коэффициент трения f на контактной поверхности листов варьировался в интервале $0 \leq f \leq 1,0$.

Моделирование позволило определить соотношение коэффициента трения, упругих характеристик и усилия затяжки листов, обеспечивающее максимальную диссипацию энергии при проскальзывании. Анализ контактных давлений в процессе нагружения композитной рессоры (рисунок 1в) свидетельствует о возможности нарушения прилегания листов, что вносит дополнительную нелинейность. Значительные резервы по демпфированию выявляются при использовании упругих ауксетичных материалов с высоким сопротивлением формоизменению [3].

2. Модели вязкоупругого деформирования. Для описания вязкоупругого поведения эластопластов, как демпфирующих материалов, применима феноменологическая модель в виде соединения элемента Максвелла и упругих элементов (рисунок 2а).

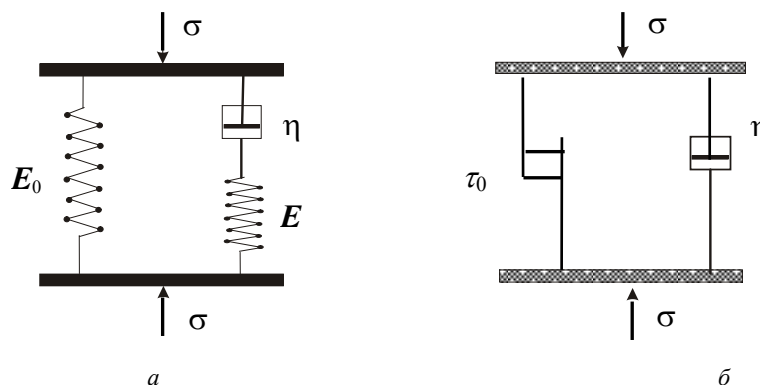


Рисунок 2 – Вязкоупругая (а) и вязкопластическая (б) модели эластопластов

Данная модель обладает свойством наследственности, т.к. напряжения в любой момент времени определяются историей нагружения и релаксацией напряжений, а также допускает мгновенную и исключает остаточную деформацию. Соответствующее дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{E_1}{\eta}\sigma = (E_0 + E_1)\frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{E_0 E_1}{\eta}\varepsilon,$$

где t – время; E_0, E_1 – модули упругости материала, η – коэффициент вязкости.

Для известного закона деформирования $\varepsilon(t)$ имеем решение

$$\sigma(t) = (E_0 + E_1)\varepsilon(t) - \frac{E_1^2}{\eta} \int_0^t \varepsilon(s) e^{-\frac{E_1}{\eta}(t-s)} ds.$$

Напряжение $\zeta(t)$ определяется значением $\varepsilon(t)$ в данный момент времени и историей изменения $\varepsilon(s), s \in (0, t)$. Как показано в [5], для определения вязкоупругих характеристик эластопластов в условиях работы амортизаторов сжатия целесообразно использовать метод динамического индентирования.

Нелинейные механические свойства имеют пористые эластопласты, например, пенополиуретаны, используемые для изготовления демпфирующих покрытий салона

автомобиля. Вязкоупругость открытопористых эластопластов малой плотности ($V_f < 0,08$) можно описывать, заменяя ячейки материала стержневыми структурными элементами [6] с параметрами ядра A , α , β релаксации Ржаницына

$$R(t) = Ae^{-\beta t} t^{\alpha-1}.$$

Связь напряжений и деформаций устанавливается соотношением

$$s_{\rho\kappa} = 2G_f \left(v_{\rho\kappa} - \int_0^t R(t-\tau) v_{\rho\kappa}(\tau) d\tau \right), \quad \sigma = 3K_f \varepsilon,$$

где $s_{\rho\kappa}$, $v_{\rho\kappa}$, σ , ε – девиаторные и шаровые части тензоров напряжений и деформаций; G_f , K_f – модули сдвига и всестороннего сжатия твердой фазы.

Исходя из указанных соотношений, были получены зависимости «напряжение-деформация», которые сравнивались с диаграммами деформирования пенополиуретана для нескольких значений скорости деформации ε . Использование эквивалентного структурного элемента позволяет прогнозировать нелинейное деформирование пористых эластопластов с различной конфигурацией ячеек при объемном содержании твердой фазы $V_f < 0,08$ и уровне сжатия до 50%.

3. Модели вязкопластического течения. Весьма высокие показатели гидравлических амортизаторов достигаются диссипацией энергии за счет вязкого трения при движении жидкой рабочей среды в кольцевом зазоре (течение Куэтта) или ее дросселировании через цилиндрический канал (течение Пуазейля) (рисунок 3).

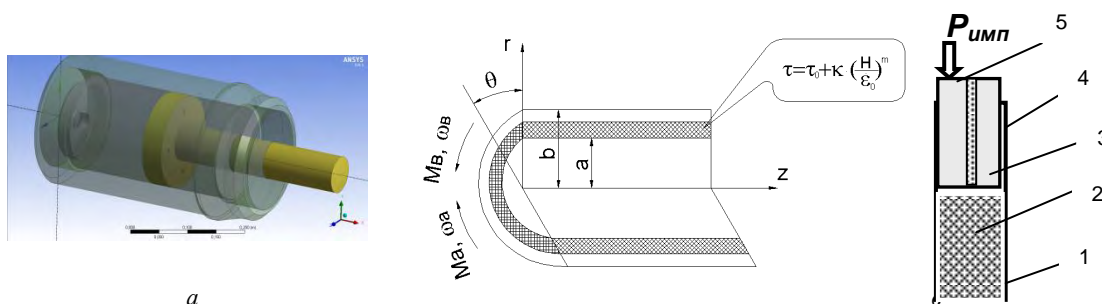


Рисунок 3 – Амортизатор (а), работающий в режиме куэттовского (б) и пуазейлевского (в) течения рабочей среды: 1 – корпус, 2 – рабочая среда, 3 – плунжер, 4 – зазор, 5 – дросселирующее отверстие

В расчетах гидравлических амортизаторов обычно используют модель рабочей среды с линейной вязкостью. Однако эластопласты, применяемые в высоконагруженных (давление до 500 МПа) поглощающих аппаратах автосцепки ж/д подвижного состава [7,8], демонстрируют нелинейную вязкопластичность (пороговое напряжение, скоростную чувствительность), что предполагает использование моделей (рисунок 2б). Для определения вязкопластических параметров стандартными методами должны быть заданы угловые скорости и моменты вращения соосных цилиндров реометра (течение Куэтта) либо расход среды и давление на входе и выходе капилляра (течение Пуазейля). Знание реологических констант позволяет проектировать демпферы для конкретных приложений, оптимизируя условия течения (зазоры, дросселирующие отверстия) либо состав эластопласта.

Демпфирование в кольцевом канале. В работе [9] анализировалось куэттовское течение вязкопластического материала при крутильных колебаниях демпфера (рисунок 3а). Диссипация энергии в этом случае обусловлена вязким трением в зазоре между коаксиальными цилиндрами с радиусами a и b ($b > a$), вращающимися вокруг общей оси с угловыми скоростями ω_a и ω_b под действием моментов M_a и M_b соответственно (рисунок 3б). Принималось, что цилиндры являются недеформируемыми, окружная скорость течения в зазоре является непрерывной и монотонной функцией радиуса, а на границах кольцевого канала заданы условия адгезии.

Записывались уравнения движения среды в цилиндрической системе координат r, φ, z с осью z , совпадающей с осью вращения цилиндров, и краевые условия для поля скоростей $U_\varphi(a) = w_a a$; $U_\varphi(b) = w_b b$. Определяющие соотношения для несжимаемого материала имеют вид [10]

$$S_{ij} = \left(\frac{2}{3} \frac{\tau}{H} \right) \xi_{ij}, \text{ где } S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij}; \quad \sigma = \frac{1}{3} \sigma_{kk};$$

$$\tau = \tau_0 + K \left(\frac{H}{\varepsilon_0} \right)^m, \text{ при } \tau \geq \tau_0 \text{ и } H = 0 \text{ при } \tau < \tau_0.$$

Здесь ξ_{ij} , S_{ij} – компоненты девиатора тензоров скоростей деформаций и напряжений, δ_{ij} – символ Кронеккера, ε_0 – характерная скорость деформации, τ_0 – предел текучести (пороговое напряжение); τ , H – интенсивности сдвиговых напряжений и сдвиговых скоростей деформации; m , K – константы материала (m – параметр скоростной чувствительности).

Было показано, что алгоритм определения момента вращения коаксиальных цилиндров при решении прямой задачи устойчив и обладает удовлетворительной сходимостью в исследуемом диапазоне τ'_0 . Определение реологических констант τ_0 , K , m по известным значениям w_a , w_b , M_a , M_b (решение обратной задачи) осуществлялось путем вычислительного эксперимента.

С целью проверки методики проводились испытания на ротационном вискозиметре с отношением радиусов коаксиальных цилиндров, равным 0,98. Для идентификации модели материала было выполнено 3 эксперимента для различных угловых скоростей с регистрацией моментов. Контрольный эксперимент показал приемлемую точность идентификации вязкопластической модели.

Демпфирование в цилиндрическом канале. Исходя из определяющих соотношений для течения Пуазейля, в [11] получены расчетные зависимости для описания течения вязкопластичной среды через цилиндрический канал (рисунок 3в) при осевом нагружении демпфера, показанного на рисунок 3а.

$$\frac{2\pi l}{K^n |\Delta p_i| (n+1)(n+2)(n+3)} \left(\frac{1}{2} \frac{|\Delta p_i|}{l} a - \tau_0 \right)^{n+1} \left\{ (n+1)(n+2)a^2 + 2r_0^2 + 2ar_0(n+1) \right\} = Q_i;$$

$$i = 1, 2, 3,$$

где $r_0 = \frac{2\tau_0 l}{|\Delta p|}$ – радиус квазитвердой области; Δp – перепад давления; μ , n , τ_0 –

реологические константы; $\left| \frac{dp}{dz} \right|$ – градиент давления, a , l – радиус и длина канала, $k = \frac{\tau_0}{a}$;

Q_i – объемный расход среды в единицу времени.

По экспериментальным данным могут быть определены значения реологических констант τ_0 , k , n для последующего использования в расчете амортизатора. Контрольный тест при скорости течения 2,8 м/с показал, что относительная погрешность расчета τ_0 , n , k не превышает 1%. При n , близком к единице, и достаточно большом перепаде давления возможна приближенная оценка расхода рабочей среды, которая при $r_0 \leq r \leq 0,5R$ отличается от точной не более, чем на 30% для любых нелинейно-вязкопластичных материалов

$$Q_n = \frac{\pi}{(4\mu)^n} \left\{ \left| \frac{dp}{dz} \right| \right\}^n (R - r_0)^{n+1} \left\{ \frac{1}{2} (R^2 + r_0^2) \right\}.$$

Заключение.

На основе эластопластов, обладающих выгодным сочетанием механических свойств, могут быть созданы эффективные демпфирующие системы технического и медицинского назначения. Этому способствует формализация нелинейно-упругого, вязкоупругого и вязкопластического поведения эластопластов путем использования механико-математических моделей и определения упругих и реологических констант из сравнительно простых, в большинстве случаев, стандартизованных испытаний. Выбор реологических параметров является эффективным средством оптимизации демпфирующих характеристик амортизаторов с использованием эластопластов в качестве рабочей среды.

Работа выполнена в рамках задания «Анализ и оптимизация демпфирующих характеристик гидравлических амортизаторов с эластомерной рабочей средой» ГПНИ «Механика 1.43»

РЕЗЮМЕ

Обсуждается применение эластопластов в качестве материала демпфирующих элементов амортизаторов удара и колебаний. Рассматриваются упругие, вязкоупругие и вязкопластические модели указанных материалов. Анализируются факторы, влияющие на диссипацию энергии при внешнем и внутреннем трении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Плескачевский, Ю.М. Биологические и технические системы – конкуренция и синтез / Ю.М. Плескачевский, А.В. Чигарев, С.В. Шилько // Механика машин, механизмов и материалов. – 2007. – Т. 1, № 1. – С. 78–89.
2. Shilko, S. Adaptive Composite Materials: Bionics Principles, Abnormal Elasticity, Moving Interfaces / In Book: Advances in Composite Materials – Analysis of Natural and Man-Made Materials / Ed. P. Tesinova, InTech, 2011. – Chapter 23. – P. 497–526.
3. Термоэластопласт полиэфирный БЕЛАСТ. ТУ РБ 03535279.055-98.
4. Плескачевский, Ю.М. Ауксетики: модели и приложения / Ю.М. Плескачевский, С.В. Шилько // Весці Акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2003. – № 4. – С. 26–36.
5. Nonlinear viscoelastic behavior of flexible cellular plastics: refined rod model / D.A. Chernous [et al.] // Int. J. of Applied Mech. and Eng. – 2003. – № 1. – P. 27–41.
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. 502–508.
7. Болдырев, А.П. Расчет и проектирование амортизаторов удара подвижного состава / А.П. Болдырев, Б.Г. Кеглин. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 199 с.
8. Манашкин Л. Гасители колебаний и амортизаторы ударов рельсовых экипажей (математические модели) / Л. Манашкин, С. Мямлин, В. Приходько – Днепропетровск: ДГУ, 2007. – 196 с.
9. Гавриленко С.Л., Шилько С.В., Васин Р.А. Определение характеристик вязкопластического материала в условиях течения Куэтта // Прикл. механика и техн. физика. – 2002. – № 3. – С. 502–508.
10. Огибалов П.М., Мирзаджанзаде А.Х. Нестационарные движения вязкопластичных сред. – М.: МГУ, 1977. – 373 с.
11. Гавриленко, С.Л. Метод описания течения и определения реологических констант вязкопластичных биоматериалов / С.Л. Гавриленко, Р.А. Васин, С.В. Шилько // Российский журнал биомеханики. – 2002. – Т. 6, № 3. – С. 90–96.

SUMMARY

Application of elastic, viscoelastic and viscoplastic mechanical and mathematical models of polymers and elastomers for description of damping process is discussed.

E-mail: Shilko_mpri@mail.ru

Поступила в редакцию 30.10.2014