

- Миколаївського державного аграрного університету. Спеціальний випуск. 2(41). – 2007. – С. 119-124.
4. Головчук А.Ф. Улучшение топливной экономичности и снижение дымности тракторного дизеля с турбонаддувом: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Киевск. авт. дор. ин. – К., 1981. – 302 с.
 5. Мельниченко В.И. Улучшение топливной экономичности и снижение дымности тракторного дизеля применением двухрежимно-всережимного регулятора: Дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Днепроп. гос. агр. ун. – Днепропетровск, 1991. – 289 с.
 6. Исследование оптимальных режимов работы машинно-тракторных агрегатов: Отчёт о НИР (заключительный) / Родичев В.А., Соловейчик А.Г., Шевцов В.Г., Головчук А.Ф., Мельниченко В.И. и др. / ВИМ; № Гр. 81069704; Инв. № 0284. 0019154. – М., 1983. – 155 с.
 7. Показники роботи трактора Т-150К з дизелем СМД-62 з серійним паливним насосом і універсальним регулятором / Мельниченко В.І., Лифенко Р.А., Головченко С.С., Чуйко А.Ю. // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 63. – С. 217-221.
 8. Мельниченко В.І. Показники роботи трактора Т-150К з дизелем СМД-62 з експлуатаційними регулюваннями серійного паливного насоса. – Дніпропетровськ: ДДАУ, кафедра «Трактори та автомобілі», 2005. – 52 с.

УДК 539.3: 620.1

Козуб Ю.Г.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЭЛАСТОМЕРОВ

Представлено методику розв'язання задач руйнування еластомерів. Критерії руйнування обчислюються на основі енергетичних інтегралів.

DYNAMIC PROBLEMS OF FRACTURE MECHANICS OF CONSTRUCTION FROM ELASTOMERS

The technique of the decision of problems of destruction of elastomers is submitted. Criteria of destruction are calculated on the basis of power integrals.

Постановка проблемы. В настоящее время широкое применение в технике находят полимерные материалы, в том числе эластомеры. Использование новых материалов позволяет снизить материалоемкость конструкций, снизить их себестоимость. Особенно широко используются эластомерные материалы при изготовлении шарниров, уплотнительной арматуры, муфт, демпферов и т.д. Зачастую конструкция представляет собой комбинацию резиновых и металлических элементов. Как правило, в таких конструкциях основную нагрузку несет эластомер. Для обеспечения надежности конструкции на этапе проектирования необходим достоверный расчет. Эластомеры относятся к гибкоцепным линейным полимерам. Температура стеклования эластомеров существенно ниже 0°C. Основными свойствами эластомеров являются их высокоэластичность, слабая сжимаемость, вязкоупругость. Изучению свойств эластомеров посвящены работы [1-5].

Обычно эластомерные элементы конструкций работают в условиях динамического нагружения, причем чаще всего циклического. В этих условиях ярко проявляются демпфирующие свойства эластомеров. Резиновые элементы конструкций сохраняют свои технологические свойства при наличии различного

рода дефектов типа трещин. В работах В.Н. Потураева, В.И. Дырды [3, 4] приведен значительный объем экспериментальных данных исследования процессов разрушения эластомеров.

Цель работы. Основной целью данной работы является разработка методики решения задачи динамического деформирования эластомерных элементов конструкций с трещинами.

Материалы исследования. Для материалов, обладающих затухающей памятью, уравнения вязкоупругости основываются на определяющих уравнениях наследственного типа, в которых компоненты напряжений и деформаций связаны между собой зависимостью, имеющей временной характер. Вид этой зависимости определяется видом реологической модели тела.

В общем случае связь между напряжениями и деформациями принимается в виде интегральных уравнений состояния записанных с помощью наследственной теории Больцмана-Вольтерра [5]

$$\sigma_{ij}(t) = E \left[\varepsilon_{ij}(t) - \int_0^t K(t-\tau) \varepsilon_{ij}(\tau) d\tau \right], \quad (1)$$

где $K(t-\tau)$ – разностное ядро релаксации эластомера.

Обычно используются разностные ядра, удовлетворяющие затухающей памяти, при этом используется принцип суперпозиции деформаций от сил, действующих в данный момент времени, и всех предшествующих сил, влияние которых тем меньше, чем больше прошло времени с момента их действия.

Для оценки демпфирующих свойств эластомера необходимо определить его реологические параметры. При оценке релаксационных процессов обычно следует оценить подвижность кинетических единиц материала. В качестве кинетических единиц в релаксационных процессах выступают мелкомасштабные элементы полимера, сегменты макромолекул, частицы активного наполнителя, диполь-дипольные локальные поперечные связи, поперечные химические связи и т.д. [1, 2]. Каждый тип кинетических единиц характеризуется своими размерами, подвижностью и своим наиболее вероятным временем релаксации. Активация движения соответствующих элементов полимера при циклическом нагружении очевидно напрямую зависит от величины диссипированной энергии и частоты нагружения, что вполне согласуется с основными результатами авторов [2]. Таким образом, при построении уравнений движения эластомерного элемента конструкции следует учитывать частотную зависимость коэффициента диссипации.

Одним из наиболее эффективных методов решения задач механики деформируемых твердых тел является метод конечных элементов.

Конечно-элементные уравнения движения в линейно-упругом случае можно представить в виде [6]:

$$Ku + C\dot{u} + M\ddot{u} = R(t), \quad (2)$$

где K – матрица жесткости;

C – матрица демпфирования;

M – матрица масс;

R – вектор узловых нагрузок;

u – вектор узловых перемещений.

При построении матрицы жесткости используется тройная аппроксимация полей перемещений, деформаций и функции изменения объема на основе моментной схемы конечных элементов [5]. Матрица масс строится с помощью интерполяционных функций формы конечного элемента. Матрица демпфирования для изотропного тела строится аналогично матрице масс.

Система уравнений движения может быть решена либо путем интегрирования по времени, либо с помощью суперпозиции форм собственных колебаний.

В задачах циклического деформирования конструкции предпочтительным является второй подход. Поскольку собственные значения и формы собственных колебаний демпфирующей и недемпфирующей систем различаются незначительно, то для расчета собственных частот и форм собственных колебаний можно ограничиться рассмотрением недемпфирующей системы

$$(K - \omega^2 M)u = 0. \quad (3)$$

Уравнение (3) представляет собой полную проблему собственных значений. Решение этой проблемы может быть получено как точными, так и численными методами.

Собственные формы колебаний удовлетворяют условиям:

$$\begin{aligned} u_{0i}^T K u_{0j} &= \begin{cases} \omega_i^2 & \text{при } i = j, \\ 0 & \text{при } i \neq j; \end{cases} \\ u_{0i}^T M u_{0j} &= \begin{cases} 1 & \text{при } i = j, \\ 0 & \text{при } i \neq j; \end{cases} \\ u_{0i}^T C u_{0j} &= \begin{cases} 2\omega_i \beta_i & \text{при } i = j, \\ 0 & \text{при } i \neq j. \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Перемещения можно представить в виде линейного разложения по собственным формам колебаний

$$u = \alpha_i u_{0i}, \quad (5)$$

где u_{0i} – собственные формы колебаний;

$\alpha_i = \alpha_i(t)$ – коэффициенты разложения.

При нормированных векторах собственных колебаний коэффициенты разложения α_i удовлетворяют системе обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\omega_i^2 \alpha_i + 2\omega_i \beta_i \dot{\alpha}_i + \ddot{\alpha}_i = \{u_{0i}\}^T \{R\} \quad (\text{по } i \text{ не суммировать}). \quad (6)$$

Зачастую для анализа собственных колебаний достаточно оценить вклад колебаний низших частот. В этом случае проблему собственных значений можно решить приближенными итерационными методами.

Для моделирования процесса трещинообразования принцип виртуальной работы, определяющий движение твердого тела между моментами времени t_1 и t_2 в предположении о неизменности объема и площади поверхности тела с учетом роста трещины определяется следующим образом [6]:

$$\int_V \left[(\sigma_{ij}^2 + \sigma_{ij}^1) \delta \varepsilon_{ij}^2 + \rho (\ddot{u}_i^2 + \dot{u}_i^1) \delta u_i^2 \right] dV - \int_S (q_i^2 + q_i^1) \delta u_i^2 dS - \int_{\Delta S_T} \sigma_{ij}^1 n_j^1 \delta u_i^2 dS = 0, \quad (7)$$

где ΔS_T – изменение площади поверхности трещины, индексы 1 и 2 соответственно относятся к соответствующим моментам времени.

Для численного решения задачи механики разрушения на основе метода конечных элементов можно воспользоваться методом стационарной сетки. Сингулярные поля деформаций в окрестности вершины трещины моделируются с помощью специальных конечных элементов [7].

Начало движения трещины определяется из условия

$$K(t) = K_d, \quad (8)$$

где $K(t)$ – коэффициент интенсивности напряжений (КИН) в окрестности трещины;

K_d – динамическая характеристика стартовой вязкости разрушения.

Надежную оценку КИН можно получить, воспользовавшись не зависящим от пути интегралами:

$$\begin{aligned} J_k &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\Gamma_\varepsilon} [(W + K)n_k - T_i n_{i,k}] ds = \\ &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[\int_{\Gamma + \Gamma_\varepsilon} [(W + K)n_k - T_i n_{i,k}] ds + \int_{V_T - V_\varepsilon} [\rho \ddot{u}_i u_{i,k} - \rho \dot{u}_i \dot{u}_{i,k}] dv \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где W – плотность энергии деформации;

$K = 1/2 \rho \dot{u}_i \dot{u}_i$ – плотность кинетической энергии;

$T_i = \sigma_{ij} n_j$ – поверхностные силы.

Для вычисления компонент J_k в системе координат трещины можно использовать метод эквивалентного объемного интегрирования [6, 7].

Для случая, когда трещина в условиях динамического нагружения не растет, величина J -интеграла непосредственно связана с удельной выделенной энергией стартовой трещины.

Таким образом, анализ напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещины при нестационарной нагрузке позволяет оценить условия прорастания трещины. Для оценки процесса движения вершины трещины необходимо непосредственно интегрировать уравнение (2), что, в свою очередь, требует развития методик дискретизации задачи по времени. В этом случае используют явные или неявные разностные схемы.

Задача 1. Определение низших частот защемленной по одной грани квадратной пластины с краевой сквозной трещиной (рис. 1). В табл. 1 приведены результаты расчета в виде безразмерных коэффициентов

$$k_i = \frac{\omega_i a^2 \sqrt{\rho h}}{\sqrt{Dg}},$$

где a, h – размеры пластины;
 D – цилиндрическая жесткость;
 g – ускорение свободного падения;
 ρ – плотность материала;
 l – длина трещины.

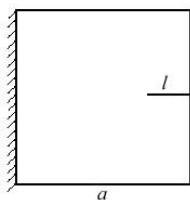


Рис. 1

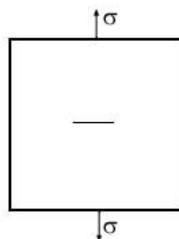


Рис. 2

Таблица 1 – Относительные коэффициенты k_i

Λk_i	k_0	k_1	k_2
$l=0$	36,3	73,9	109,1
$l=0,02a$	36,95	74,71	109,81
$l=0,04a$	37,36	75,53	110,89
$l=0,06a$	37,82	75,92	111,79
$l=0,08a$	38,27	76,48	112,92
$l=0,1a$	38,79	77,36	113,78

Задача 2. Растяжение квадратной плиты с центральной трещиной, подверженной стационарному растягивающему нагружению, при котором начинает развиваться трещина (рис. 2). Начальные размеры трещины $l_0=0,02a$.

В табл. 2 приведены относительные значения J-интеграла при различной длине движущейся трещины.

Таблица 2 – Относительные значения контурных интегралов

l/l_0	1	1,25	1,5	1,75	1,1	1,5	1,2
$J/J(l_0)$	1	0,897	0,834	0,776	0,753	0,711	0,682
$J/J(l_0)$ [6]	1	0,921	0,862	0,814	0,783	0,745	0,692

Результаты, получены с помощью подсистемы ДИНЭМА в рамках вычислительного комплекса «МРЕЛА+» [8], удовлетворительно совпадают с результатами, представленными в работе [6].

Выводы. На основании решения задачи динамического разития трещины, проведен анализ энергетического критерия разрушения для развивающейся трещины. Для решения задачи динамического деформирования конструкции с трещиной разработан конечноэлементный поход, который базируется на разложении искомого решения по собственным формам колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бартнев Г.М., Зеленеv Ю.В. Физика и механика полимеров. – М.: Высш. школа, 1983. – 391 с.
2. Бартнев Г.М. Структура и релаксационные свойства эластомеров. – М.: Химия, 1979. – 288 с.
3. Потураев В.Н., Дырда В.И., Круш И.И. Прикладная механика резины. – К.: Наук. думка, 1980. – 260 с.
4. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. – К.: Наук. думка, 1988. – 232 с.
5. Киричевский В.В., Сахаров А.С. Нелинейные задачи термомеханики конструкций из слабо-сжимаемых эластомеров. – К.: Будівельник, 1992. – 216 с.
6. Вычислительные методы в механике разрушения / Под ред. С. Атлури. – М.: Мир, 1990. – 392 с.
7. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г. Метод конечных элементов в механике разрушения эластомеров. – К.: Наук. думка, 1998. – 200 с.
8. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «МРЕЛА+» / Под общ. ред. Киричевского В.В. – К.: Наук. думка, 2005. – 403 с.

УДК 539.3:620.1

Козуб Г.А.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ПОЛЯ В ШИНАХ

Запропонована модель розрахунку температурних полів саморозігріву великогабаритних шин.

THE TEMPERATURE FIELDS ARE IN TIRES

The model for calculation a temperature fields to self-heating of large-sized tires is offered.

Введение. В народном хозяйстве Украины крупногабаритные шины (КГШ) используются на транспортных и вскрышных работах горно-обогатительных комбинатов при добыче открытым способом руды и угля. В целом в мире около 60 % горной массы перевозится автосамосвалами, оснащенными КГШ и сверхкрупногабаритными шинами СКГШ. КГШ относятся к классу внедорожных шин отличающихся от других шин такими особенностями, как многослойность, большой вес и высокая единичная стоимость (карьерные, строительно-дорожные КГШ и СКГШ).

Широкое применение автосамосвалов большой грузоподъемности привело к необходимости создания и усовершенствования крупногабаритных шин повышенной эксплуатационной производительности.

Связанные термомеханические поля определяют характер износа и долговечность крупногабаритных и грузовых шин. Наиболее частыми случаями отказа КГШ и грузовых шин являются тепловые разрушения. Поля температур, воз-