

УДК 622.002.5

Гордиенко Н.А., Дырда В.И., Шолин М.К.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЛОКАЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РЕЗИНЫ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ РАЗРУШЕНИИ

Розглядаються методи прогнозування локальної довговічності металевогумових віброізоляторів важких гірничих машин.

SOME PROBLEMS OF LOCAL LONGEVITY OF GUM AT LONG-LIVED CYCLIC BREAKING DOWN

The methods of prediction of local longevity metal-rubber vibroinsulators of heavy mountain machines are considered.

Как известно, физической причиной разрушения резины является флуктуация внутренних термодинамических параметров. В этой связи становится очевидным, что разрушение возникает в неравновесной области состояний и носит эволюционный характер. Известно также, что для равновесных и линейно-необратимых процессов существует отклик системы на флуктуации, возвращающий ее в исходное состояние, а, следовательно, включающий всякое необратимое изменение свойств материала и его разрушение.

В работе [1] дается критерий флуктуационной устойчивости термодинамических систем

$$\delta_x \sigma = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\delta^2 S}{2} \right) \geq 0,$$

где $\delta_x \sigma$ — избыток продукции энтропии вследствие флуктуаций;

δS — отклонение энтропии от равновесного значения в результате флуктуаций.

Отсюда видно, что появление отрицательного вклада в избыток продукции энтропии может нарушить флуктуационную устойчивость системы. Именно такие явления имеют место для открытых систем, в которых идут нелинейные необратимые процессы и разрушение материала.

Таким образом, разрушение материалов является одним из проявлений флуктуационной неустойчивости внутренних термодинамических параметров системы в нелинейно неравновесных процессах, каковыми являются достаточно интенсивные условия нагружения. Качественно это дает объяснение значительной разрушающей способности циклических нагрузок по сравнению со статическими.

Очевидно, что нелинейность процесса разрушения обусловлена взаимосвязью роста повреждений с общим уровнем поврежденности, т.е. в основе термодинамики разрушения лежит автокаталитический механизм.

Как известно, нелинейные процессы не имеют определенной кинетики, т.е. при заданных внешних условиях нагружения может реализовыв-

ваться несколько кинетик. В каждый момент времени реализуется та кинетика, которая наиболее устойчива по отношению к флуктуациям внутренних параметров. При нарушении этой устойчивости происходит смена кинетик. Из практики известно, что разрушение материалов происходит, как правило, через некоторое число эволюционных этапов, последовательно сменяющих друг друга. Условия, при которых происходит смена кинетик разрушения, получили название условий бифуркаций решений.

Флуктуационно-диссипативная теорема [2] устанавливает связь между уровнем флуктуации в термодинамической системе и диссипацией энергии. На связь диссипативных свойств эластомеров с разрушением указывается и в работе [3]. Здесь, в частности, отмечается, что если энергия разрушения для наполненных и ненаполненных эластомеров примерно одинакова, то около $4/5$ подведенной энергии рассеивается в случае типично наполненных и около $1/2$ (или несколько меньше) в случае ненаполненных.

Таким образом, можно констатировать, что закономерности разрушения эластомерных материалов в условиях как циклического, так и статического нагружения находят свое объяснение в рамках термодинамики необратимых нелинейных процессов. Это направление в современных исследованиях механики разрушения эластомерных материалов представляется наиболее общим и перспективным.

Ниже рассмотрим возможности использования энергетического критерия [4], сочетающего теоретические возможности термодинамики процессов разрушения и механики сплошной среды. При выводе критериальных уравнений существенным является то, что вся энергия, диссипируемая в материале, расходуется на два процесса: теплообразование и разрушение. Это допущение обосновано для установившихся процессов, связанных с производством и отдачей тепла и с независимостью свойств материала от температуры, что справедливо в определенном диапазоне частот и амплитуд нагружения, охватывающем в основном область нагрузок, характерных для тяжелых горных машин в процессе их интенсивной эксплуатации.

При сохранении основных гипотез, принятых выше, для процессов усталостного разрушения появляется возможность введения в рассмотрение некоторого коэффициента η_T [4, 5], определяющего отношение энергии, идущей на теплообразование в массиве элемента, к полной механической энергии, рассеивающейся в материале при циклическом деформировании. Приняв в первом приближении этот коэффициент не зависящим от условий нагружения и температуры окружающей среды, получаем критериальное уравнение в виде

$$N^* = \frac{\Delta U_p^*}{\frac{1}{2}G_d \gamma^2 \psi (1 - \eta_v)},$$

где ΔU_p^* — предельное (критическое) значение плотности внутренней энергии;

G_d — динамический модуль сдвига;

γ — относительная деформация сдвига (ε и E_d для сжатия);

ψ — коэффициент диссипации энергии.

В общем случае для произвольной точки резинового массива

$$N^* = \frac{\Delta U_p^*}{\frac{1}{2}G_d \gamma^2 \psi (1 - \eta_v) f(x, y, z)},$$

где $f(x, y, z)$ — функция, характеризующая распределение полей напряжений и деформаций в объеме резинового массива.

Если определить коэффициент η_T достаточно точно, то число параметров, связывающих значение времени до разрушения эластомерных элементов конструкций с их характеристиками, может быть уменьшено. Так, при сделанных выше предположениях относительно коэффициента η_T энергетический критерий эквивалентен критерию по диссипируемой энергии

$$N^* = \frac{\Delta U_p^*}{\frac{1}{2}G_d \gamma^2 \psi f(x, y, z)},$$

где $\Delta U_a^* = \Delta U_p^* / (1 - \eta_v)$ — критическое значение энергии, диссипируемой в материале резины.

Рассмотрим в качестве примера определение долговечности виброизолятора типа ВРМ [7].

Комплекс теоретических исследований в этом направлении сводится к определению напряженно-деформированного состояния, полей температур, жесткостных и диссипативных характеристик, прогнозированию срока службы.

Для определения напряженно-деформированного состояния необходимо решать краевую задачу теории упругости практически несжимаемой среды для конечной области со смешанными граничными условиями. При этом следует учитывать ужесточающее воздействие металлических пластин, которые ввиду несжимаемости (или слабой сжимаемости) резины порождает целый ряд специфических механических эффектов даже в области малых деформаций.

Для исследования напряженно-деформированного состояния виброизоляторов со сложной формой торцевых или боковых поверхностей в настоящее время широко используются методы, основанные на теории потенциала, и метод конечных элементов (МКЭ), при этом последний

является наиболее эффективным подходом к исследованию напряженно-деформированного состояния элементов в пространственной постановке. Существует достаточное количество разработанных программ, основанных на МКЭ, которые могут быть непосредственно использованы при расчете рассматриваемых виброизоляторов. В работе используется алгоритм конечно элементного анализа [6]. Эффект объемного сжатия не учитывается, коэффициент Пуассона ν принимается равным 0,495. Полученные результаты по расчетам напряженно-деформированного состояния используются в дальнейшем в общем алгоритме при комплексном расчете виброизоляторов ВРМ: рассчитывается жесткость и диссипативная функция — энергетическая характеристика, определяющая часть механической энергии, рассеянной в материале при заданных условиях нагружения; определяются максимальные значения температур, установившихся в массиве элемента; устанавливаются локальные объемы резинового массива с максимальным значением диссипативной функции.

Затем применительно к этим областям определяется локальная долговечность ВРМ путем решения критериального уравнения.

Таким образом формируется следующая расчетная схема:

1) уравнения равновесия

$$\nabla^2 \bar{u} + \frac{1}{1-2\nu} \text{grad div } \bar{u} = 0, \tag{1}$$

где ∇^2 — оператор Лапласа;

\bar{u} — вектор перемещений;

ν — коэффициент Пуассона с граничными условиями, отражающими условия нагружения, в частности, при кинематическом возбуждении опорных поверхностей виброизолятора;

$$u_r = 0; \quad u_z = 0 \quad \text{— на нижней грани резинового массива,} \tag{2}$$

$$u_r = 0, \quad u_z = FA_0 \sin \omega t \quad \text{— на верхней грани резинового массива;}$$

u_r, u_z — радиальное и осевое перемещения соответственно, нагружения $\tau_{rz}, \tau_z = 0$ — на боковой поверхности виброизолятора;

2) уравнение стационарной теплопроводности

$$k \text{ div grad } T + D' = 0, \tag{3}$$

где k — коэффициент теплопроводности;

D' — усредненная за цикл диссипативная функция, определяемая выражением:

$$D' = \frac{\omega}{2\pi} \left[2G'' \left(|\varepsilon_z|^2 + |\varepsilon_\varphi|^2 + |\varepsilon_r|^2 + 2|\varepsilon_{rz}|^2 + \frac{(3K'' - 2G'')}{3|\varepsilon_z + \varepsilon_\varphi + \varepsilon_r|^2} \right) \right], \tag{4}$$

где $\varepsilon_z, \varepsilon_\varphi, \varepsilon_r, \varepsilon_{rz}$ — компоненты тензора деформаций, вычисляемых через перемещения u_r, u_z по формулам теории упругости;

$$G'' = \frac{C_q \psi}{2\pi}; \quad 3K'' = \frac{2G''(1+\nu)}{1-2\nu},$$

где G'' — динамический модуль упругости;
 ψ — коэффициент диссипации энергии.

Граничные условия в предположении конвективного теплообмена с окружающей средой, происходящего на поверхности виброизолятора, имеют вид:

$$\begin{aligned} k \operatorname{grad} T \vec{n} &= \alpha_1 (T - T_0) && \text{— на боковой поверхности;} \\ k \operatorname{grad} T \vec{n} &= \alpha_2 (T - T_0) && \text{— на опорных поверхностях;} \\ T &= T_0 && \text{в начальный момент времени,} \end{aligned} \quad (5)$$

где T_0 — температура окружающей среды;
 3) уравнение локальной долговечности

$$\int_0^{t^*} \dot{U}_\rho dt = \int_0^{t^*} (\tau_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} - \dot{q} + \dot{\chi}) dt,$$

где \dot{U}_ρ — часть внутренней энергии, которая расходуется на перестройку системы (разрушение);

$\tau_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ — энергия, диссипируемая в материале при его деформировании;

\dot{q} — тепловая энергия;

$\dot{\chi}$ — энергия немеханического воздействия;

t^* — время локального разрушения.

В рассматриваемой схеме расчета используется энергетический критерий разрушения, как наиболее перспективный в настоящее время и обладающий большими потенциальными возможностями. Критерий сочетает теоретические возможности термодинамики процессов разрушения и механики сплошной среды и формулируется следующим образом: разрушение системы происходит в тот момент, когда плотность энергии разрушения достигнет некоторой критической величины, являющейся постоянной характеристикой материала. Применительно к резиновым деталям этот критерий обоснован в [4], там же проведена конкретизация критериальных уравнений для расчета долговечности резинометаллических блоков и шарниров. При выводе этих уравнений существенным является предположение о том, что вся энергия, диссипируемая в материале, расходуется на два процесса: теплообразование и разрушение. Это допущение справедливо для установившихся процессов, связанных с производством и отдачей тепла и с независимостью свойств материала от температуры, что справедливо в определенном диапазоне частот и амплитуд нагружения. Существенным при выводе этих уравнений является также наличие решений задачи (1)-(5) в замкнутом виде.

Для описания термомеханического поведения исследуемых виброизоляторов такие решения построить невозможно, для расчета полей температур в рамках конечноэлементного анализа используются численные методы; в этой связи целесообразно принять критериальное уравнение в виде [5]

$$t^* = \Delta U_d^* / D, \quad (6)$$

где ΔU_d^* — как и выше критическое значение диссипируемой в материале энергии;

t^* — время разрушения локального объема, определенного значением D' согласно (4).

Еще раз отметим, что критериальное уравнение (6) справедливо в применении к описанию процессов усталостного разрушения, протекающего в диапазоне температур

$$0 < T < T_{доп},$$

где $T_{доп}$ для большинства амортизационных резин равно $\approx 60-70$ °С.

В этом диапазоне температур свойства слабо- и средненаполненных резин на основе натурального НК и синтетического изопренового СКИ-3 каучуков можно принять постоянными [4].

При постановке задач (1-6), кроме указанных выше предположений, были приняты также следующие экспериментально обоснованные положения:

- 1) материал виброизоляторов линейно-вязкоупругий;
- 2) напряженно-деформированное состояние квазистатическое, т.е. все компоненты тензоров напряжений и деформаций изменяются по гармоническому закону согласно условиям нагружения;
- 3) коэффициент Пуассона — постоянная величина.

При сделанных предположениях задачи (1-6) решались для трех типоразмеров виброизоляторов. В таблице приведены основные числовые параметры, характеризующие исследуемые виброизоляторы, их термомеханическое поведение и локальную долговечность. Расчет выполнен для средненаполненной резины типа 2959: $G'' = 8 \cdot 10^4$ Па; $k = 0,3$ Вт/(м·К); $\nu = 0,495$; $\Delta U_d^* = 1,33 \cdot 10^{12}$ Дж/м³ при следующих условиях нагружения $\omega / (2\pi) = 14$ Гц; $\varepsilon_0 = A_0 / H = 0,01$; $T_0 = 20$ °С.

Таблица — Расчетные значения локальной долговечности ВРМ

Высота, H , мм	Диаметр D , мм	D_{max}^* , Дж/(м ³ с)	t_1^* , ч	θ_{max} , °С	t_1^* , ч
100	180	15800	23400	25	62000
65	200	32470	11400	18	40000
40	195	58750	6300	10,5	27000

Для других условий нагружения и марок резин расчет локальной долговечности исследуемых ВРМ осуществляется согласно формуле

$$t_u^* = t^* k',$$

где t_u^* — искомая величина локальной долговечности;
 k' — коэффициент, равный

$$k' = \frac{G_u^{n_2} A_0^2 \omega^2}{G_u^{n_2} A_u \omega_u^2};$$

$G_u^{n_2}$, A_u , ω_u — параметры, характеризующие искомый вариант расчета;

G'' , A_0 , ω — параметры, соответствующие расчетному варианту.

По аналогичной формуле производится пересчет температуры

$$\theta_u = \theta(k')^{-1},$$

где θ_u — приращение температуры диссипативного разогрева в искомом варианте расчета;

θ — приращение температуры в расчетном варианте.

В таблице приведены значения максимальной диссипативной функции (соответствует границе резина-металл) и максимальному приращению температуры диссипативного разогрева (соответствует средней части резинового массива), а также соответствующие им значения времени локального разрушения. Очевидно, что разрушение исследуемых виброизоляторов начинается на границе резина-металл, что подтверждается эксплуатационными испытаниями ВРМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригожин И., Николис Г. Биологический порядок, структура и неустойчивости // Успехи физических наук. -1973. -Т. 109, № 3. -С. 517-543.
2. Де Гроот С., Мазур П. Неравновесная термодинамика. -М.: Мир, 1985. -452 с.
3. Либовиц Г. Разрушение неметаллов и композитных материалов. -М.: Мир, 1976. -С. 8-66.
4. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. -Киев: Наук. думка, 1988. -232 с.
5. Мазнецова А.В. Прогнозирование локальной долговечности резинометаллических элементов горных машин // АН УССР. Ин-т геотехн. механики. -Днепропетровск, 1987. -9 с. -ДЕП в ВИНТИ 24.04.87, № 2954.
6. Исследование термомеханического поведения эластомерных конструкций, имеющих форму тел вращения / Дырда В.И., Козлов В.И., Мазнецова А.В., Спивак И.Л. // АН УССР. -Ин-т геотехн. механики. -Днепропетровск, 1987. - 15 с. -ДЕП в ВИНТИ 03.06.87, № 5548. -В87.
7. Дырда В.И., Чижик Е.Ф. Резиновые детали в машиностроении. -М.; Днепропетровск: Полиграфист, 2000. -582 с.