УДК 678.4.06:621.81 DOI: https://doi.org/10.15407/geotm2020.151.128

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ МАШИН С УЧЕТОМ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ В НИХ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

[1]Агальцов Г.Н.

[1]Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН З УРАХУВАННЯМ ПОШКОДЖЕНЬ, ЩО В НИХ РОЗВИВАЮТЬСЯ

[1]Агальцов Г.М.

[1]Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

DETERMINATION OF THE TEMPORAL CHARACTERISTICS OF THE ELASTIC ELEMENTS OF MACHINES TAKING INTO ACCOUNT THE DAMAGE DEVELOPING IN THEM

[1]Ahaltsov H.M.

[1]Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of NAS of Ukraine

Аннотация. Рассматривается алгоритм определения изменения основных физико-механических характеристик упругих элементов машин, работающих при длительных циклических нагрузках в условиях горно-металлургического производства. Такие нагрузки приводят к существенному изменению структуры материала во времени эксплуатации. В конечном итоге это приводит к накоплению повреждённости и к изменению макрохарактеристик материала: модуля сдвига G и коэффициента диссипации ψ.

К таким машинам относятся грохоты, питатели, выбивные решётки, центрифуги, жатки, вибрационные машины сельскохозяйственного производства и т.д. Механические свойства резиновых элементов таких машин не остаются постоянными в процессе нагружения, а их изменения обычно приводят к изменению параметров колебаний подвижных частей машин, а иногда и к изменению технологического процесса. При этом весьма важным является накопление повреждённости в массиве резиновой детали.

Повреждённость материала является первопричиной потери любым изделием работоспособности, что в конечном итоге приводит к его отказу. В этой связи формирование характеристик резиновых элементов конструкций, как функции развивающейся повреждённости, является актуальной задачей, представляющей научный и практический интерес.

Для её решения используется разработанный для композитных материалов метод Валпола, позволяющий определять эффективные (усреднённые по некоторому объёму резинового массива) характеристики с учётом развивающейся в материале повреждённости.

При расчёте применяется следующая модель усталостного разрушения. Исследуемый резиновый элемент представляется совокупностью материальных точек (или характерных объёмов), каждая из которых наделена свойствами исходного материала. Процесс накопления и развития микроповреждений в материале под действием внешних нагрузок интерпретируется как образование в первоначально однородном материале некоторых областей, имеющих вследствие своей изолированности характер включений. Предполагается, что свойства всех включений идентичны между собой, но существенно отличны от свойств исходного материала.

На основании этой модели были определены две основные информационные макроскопические характеристики резины: модуль сдвига и модуль потерь (коэффициент диссипации) в зависимости от функции поврежденности материала. В работе рассматривается алгоритм определения долговечности резиновых элементов на основе обобщённого критерия разрушения; этот критерий позволяет связать в единое целое микро- и макрохарактеристики материала. Получено уравнение для критерия структурной устойчивости резиновых элементов при длительных циклических нагрузках. Показано, что теоретические данные хорошо согласуются с экспериментом: для конкретной системы вихревых смесителей аглофабрик время выхода жесткостных характеристик за пределы допускаемых значений получено в пределах 10-12 лет, что хорошо согласуется с практикой.

Ключевые слова: диссипация, метод Валпола, микроповреждения, обобщенный критерий разрушения, упругие элементы

1. Связь макроскопических характеристик резины с повреждённостью

С помощью принятой модели исследуем две информационные характеристики резины, полностью описывающие их вязкоупругое поведение: динамический модуль упругости G' и модуль потерь G'', при этом комплексный модуль с учётом развивающейся в материале повреждённости (и соответствующей анизотропией свойств) запишется в тензорном виде

$$\hat{G}^* = \hat{G}' + i\hat{G}'',$$

где знак ^ означает тензорные величины, или

$$G^*_{ijkl} = G'_{ijkl} + iG''_{ijkl}.$$

При построении эффективных характеристик $\hat{G}'_{эф}$ и $\hat{G}''_{эф}$ сделаем ряд предположений:

- резина в исходном состоянии однородна и изотропна;
- образующиеся включения характеризуются своей концентрацией $p(t)$ в произвольном характерном объёме, изменяющейся во времени;
- модули образующихся включений (G'_1, G''_1) связаны с модулями исходного материала G'_0, G''_0 соотношениями типа

$$G'_1 = f\left(G'_0\right);$$

- развивающиеся включения математически характеризуются матрицей модулей упругости, аналогичной матрице модулей упругости основного материала;
- упругие модули материала включений не зависят от времени, т.е. свойства дефектов не меняются в процессе разрушения, а тот факт, что повреждённость материала растёт, отражён функцией $p(t)$;
- исследуемые характеристики относятся к первому этапу разрушения, который характеризуется зарождением и развитием дефектов (повреждённости) и имеет с точки зрения термодинамики характер квазиравновесного процесса.

При сделанных выше предположениях согласно [1-3] выражение эффективного модуля $\hat{G}'_{эф}$ (аналогично и для $\hat{G}''_{эф}$) запишется в виде

$$\hat{G}'_{эф} = \hat{G}'_1 + (1-p)(\hat{G}'_0 - \hat{G}_1) : [\hat{I} + p(\hat{\bar{G}}_0 + \hat{G}'_1)^{-1} : (\hat{G}_0 - \hat{G}_1)]^{-1}, \quad (1)$$

где $\hat{G}'_1$ – тензор модулей упругости включения;

$\hat{\bar{G}}'_0$ – изотропный тензор, компоненты которого представляются в виде

$$\bar{G}'_{ijkl} = \frac{\mu(\lambda + 6\mu)}{(3\lambda + 8\mu)}\delta^{ij}\delta^{kl} + \frac{\mu(9\lambda + 14\mu)}{2(3\lambda + 8\mu)} \cdot (\delta^{il}\delta^{ik} + \delta^{jl}\delta^{jk}),$$

λ и μ – коэффициенты Ляме основной среды;

δ^{ij} – символы Кронекера;

$\hat{I}$ – единичный четырёхвалентный тензор, компоненты которого имеют вид

$$\hat{I} = \frac{1}{2}(\delta^{ik}\delta^{jl} + \delta^{il}\delta^{jk}),$$

p – полная концентрация включений в характерном объёме материала.

Для конкретизации выражения (1) применительно к $\hat{G}'_{эф}$ и $\hat{G}''_{эф}$ следует установить вид функциональных соотношений между свойствами исходного материала и развивающихся включений. При этом примем во внимание следующие, хорошо известные из механики резины, положения:

- старение резины характеризуется параллельно протекающими процессами структурирования и деструкции;
- процессы структурирования являются преобладающими;
- при структурировании наблюдается разрыв химических связей и образование новых.

В связи со сказанным выше, а также на основании экспериментальных данных для $\hat{G}'_1$ и $\hat{G}''_1$ будут приняты разные модели.

Остановимся сначала на формировании выражения для $\hat{G}'_{эф}$. Примем $\hat{G}'_1 = n'\hat{G}'_0$, т.е. модуль образующихся включений в n' раз больше модуля основного материала.

С учётом сделанных предположений и, представив независимые компоненты тензора напряжений в виде шестимерной матрицы-столбца [4], записываем матрицы модулей упругости $\hat{G}'_0$ и $\hat{G}'_1$ в виде

$$\hat{G}'_0 = \begin{Vmatrix} G'_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G'_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G'_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G'_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G'_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G'_0 \end{Vmatrix} = G'_0 \cdot \hat{I}, \tag{2}$$

$$\hat{G}'_1 = n' G'_0 \hat{I}, \tag{3}$$

$$\hat{\bar{G}}'_0 = \begin{Vmatrix} 10G'/3 & G'_0/3 & G'_0/3 & 0 & 0 & 0 \\ G'_0/3 & 10G'_0/3 & G'_0/3 & 0 & 0 & 0 \\ G'_0/3 & G'_0/3 & 10G'_0/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3G'_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3G'_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3G'_0 \end{Vmatrix}. \tag{4}$$

Произведя тензорные операции в (1) согласно [5], получаем для $\hat{G}'_{эф}$ следующее выражение

$$\hat{G}'_{эф} = \begin{Vmatrix} A & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & B & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & B \end{Vmatrix}, \tag{5}$$

где $A = G'_0\left[n' + \dfrac{(1-p)(1-n')\Delta}{\Delta + p\Delta_1(1-n')}\right]$, $B = G'_0\left[n' + \dfrac{(1-n')(1-p)(n'+3/2)}{(n'+3/2)+2p(1-n')}\right]$,

$$\Delta = \left[4\left(n'+\frac{5}{3}\right)^3 - \frac{1}{3}\left(n'+\frac{5}{3}\right) + \frac{1}{9}\right], \quad \Delta_1 = 4\left(n'+\frac{5}{3}\right)^2 - \frac{1}{9}.$$

С использованием выражения для $\hat{G}'_{эф}$ строим связь между деформациями и напряжениями в виде

$$\begin{Vmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{Vmatrix} = \hat{G}'_{эф} \begin{Vmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yz} \end{Vmatrix}. \tag{6}$$

Если рассматривать деформацию чистого сдвига (такая деформация часто встречается при работе резинометаллических элементов типа БРМ в вибрационных машинах), то $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = 0$, и получаем следующее соотношение между касательным напряжением σ_{xy} и деформацией сдвига ε_{xy}

$$G'_{эф}(p) = G'_0\left[n' + \frac{(1-n')(1-p)(n'+3/2)}{(n'+3/2)+2p(1-n')}\right], \quad \sigma_{xy} = G'_{эф} \cdot \varepsilon_{xy}. \tag{7}$$

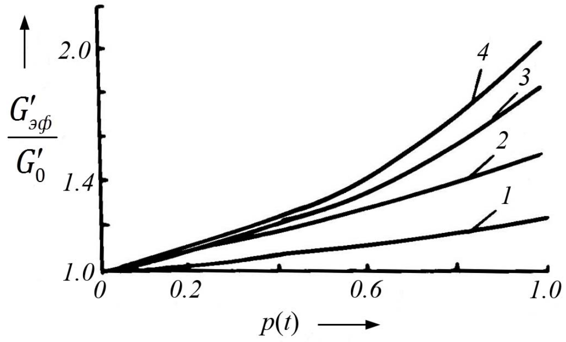
Относительно значения n' в известной литературе данных нет, в дальнейшем выбор n' может быть основан на экспериментальных результатах. Рассчитанная по формуле (7) зависимость эффективного модуля от повреждённости показана на рис. 1.

Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными показывает, что построенная зависимость $G'_{эф}(p)$ соответствует характеру изменения абсолютной величины комплексного модуля сдвига и может быть использована для учёта нестабильности механических свойств слабо- и средненаполненных резин. При этом для наполненных резин следует уточнить вид функции $f(G'_0)$.

Следует сделать ещё одно замечание относительно области применимости полученных результатов. Экспериментальные исследования показывают, что в широком диапазоне частот и амплитуд, характерных для работы вибрационных машин, значение статического модуля примерно равно значению динамического: $G_\infty = G'_0$ для слабонаполненных резин. Для резин на основе СКИ-3 с наполнением техническим углеродом более 20 масс.ч. имеет место функциональная зависимость

$$G'_0 = 1{,}34G_\infty - 0{,}2\ (\text{МПа}),$$

которая может быть использована при описании механических характеристик эластомерных элементов для разных типов резин; G_∞ определяется из статических испытаний.



1 – n' = 1,2; 2 – n' = 1,5; 3 – n' = 1,8; 4 – n' = 2,0

Рисунок 1 – Зависимость эффективного модуля упругости от повреждённости

Изложенный выше алгоритм может быть применён к построению функциональной зависимости другой эффективной характеристики $\hat{G}''_{эф}$. При этом принимается следующая физическая модель разрушения. Включения, развивающиеся в первоначально однородном материале, моделируются разрывами химических связей и ориентируются по направлению рвущихся связей. В соответствии с этим упругие свойства материала таких включений в базисе главных осей тензора напряжений можно представить в виде

$$\hat{G}''_{1эф} = \begin{Vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G''_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G''_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G''_0 \end{Vmatrix}. \tag{8}$$

Используя выражения (2), (4), (8), на основании (1) получаем матрицу значений для $\hat{G}''_{эф}$

$$\hat{G}''_{эф} = \begin{Vmatrix} \dfrac{56G''_0(1-p)}{17p+28} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G''_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & G''_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dfrac{G''_0(1-p)}{1+(2/3)p} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dfrac{G''_0(1-p)}{1+(2/3)p} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G''_0 \end{Vmatrix}. \tag{9}$$

Для случая чистого сдвига

$$G''_{эф}(p) = \frac{(1-p)G''_0}{\frac{2}{3}p + 1}. \quad (10)$$

Соответствующая зависимость представлена на рис. 2, где, как и в предыдущем случае, нестабильность свойств определяется эволюционным уравнением $p(t)$, вид которого может быть принят [4]

$$p(t) = 1 - e^{-k't},$$

где k' – параметр, зависящий от типа резины и условий нагружения.

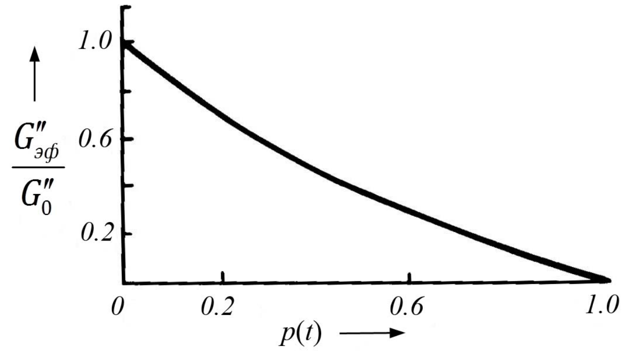


Рисунок 2 – Зависимость эффективного модуля потерь от повреждённости

С использованием выражений (7), (10) и равенства

$$\psi(p) = \frac{2\pi G''}{G'}$$

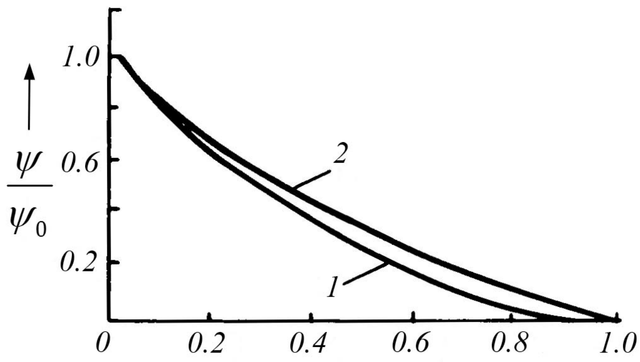
получаем значение коэффициента диссипации энергии как функции повреждённости

$$\psi(p) = \frac{(1-p)\psi_0}{\left(\frac{2}{3}p + 1\right)\left[n' + \frac{(1-n')(1-p)(n'+3/2)}{n'+3/2+2p(1-n')}\right]}, \quad (11)$$

где $\psi_0 = \frac{2\pi G''_0}{G'_0}$.

На рис. 3 представлена зависимость технического коэффициента диссипации ψ от повреждённости, её сравнение с соответствующей эмпирической временной зависимостью показывает их качественное совпадение.

Обобщая изложенное выше, можно сделать вывод о том, что разработанный метод является методом прогнозирования жесткостных и диссипативных свойств ($G(p)$ и $\psi(p)$) эластомерных элементов в связи с развивающейся повреждённостью, позволяет также связать микро- и макрохарактеристики разрушения эластомерных элементов.



1 – n' = 2; 2 – n' = 1,2

Рисунок 3 – Зависимость коэффициента диссипации от повреждённости

2 Формирование структурно-энергетического критерия разрушения эластомеров

Рассмотрим алгоритм определения t^* на основе обобщённого критерия разрушения, который соединяет в себе достоинства энергетического критерия и критерия по поврежденности, связывает в единое целое микро- и макрохарактеристики резины как упруго-наследственной среды и использует некоторую постоянную резины k_1, не зависящую от конструкции детали. Это уравнение было получено в работе [6] и имело следующий вид

$$N_{кр}^{*}=\frac{2k_1T\Delta p^{*}}{G_0'(p)\varepsilon_0^2\psi(p)};$$

$$G_{эф}'(p)=G_0'\left[n'+\frac{(1-n')(1-p)(n'+3/2)}{(n'+3/2)+p(1-n')}\right],$$

где Δp^{*} – критическое значение поврежденности резины.

Критерий устойчивости резиновой детали будем связывать с основным информационным параметром – модулем сдвига G. Физически это будет означать следующее: система (в конкретном случае виброизолятор) потеряет устойчивость при выходе параметра G за пределы допускаемых значений. При этом величины допускаемых значений определялись экспериментально, а величина критической поврежденности резины принималась согласно полученным экспериментальным данным [6] $p_{кр}$ = 5,6; кинетическая кривая также была получена экспериментально на модельных образцах при длительном циклическом нагружении [6].

Так, для цилиндрических виброизоляторов ВРМ903 из резины 2959 при длительном нагружении (комбинация статической нагрузки и циклической при малых значениях амплитуды нагружения) критическое значение модуля сдвига равно $G_{кр} = (1{,}6\div1{,}8)G_{нач}$.

В этом случае критерий структурной устойчивости резиновой детали можно записать в виде

$$G_0(p)=\frac{N^{*}\varepsilon_0^2\psi(p)}{2k_1Tp_{кр}}\le G_{кр}. \qquad (12)$$

Следует отметить, что нарушение структурной устойчивости в случае (12) рассматривается уже как стадия предразрушения, но ещё не происходит полного разрушения элемента виброзащиты. На практике такое явление нежелательно, и устраняется, как правило, заменой упругого элемента.

Структурные изменения в массиве резины элементов виброзащиты при длительных циклических нагрузках объясняют переход от рассеянного локального разрушения элемента к глобальному, характеризуемый резким изменением механических параметров.

Рассмотрим конкретный пример структурной устойчивости резинометаллических элементов типа ВРМ903 системы виброизоляции вихревых смесителей [7]. Данные для расчёта: масса колеблющихся частей на один элемент 1400 кг; вертикальная жёсткость одного элемента 1,46 МН/м^2, частота колебаний корпуса смесителя 14 Гц.

При подстановке данных в уравнение (12) получаем время до выхода параметра G за пределы допускаемых значений, т.е. $G_0'(p) \le G_{кр}$, примерно 10-12 лет эксплуатации, что удовлетворительно совпадает с практикой.

Если сравнить эту зависимость с экспериментальной зависимостью $G(t)$, представленной в [6], то убедимся, что количественно совпадают лишь крайние точки. Качественное несовпадение этих зависимостей связано прежде всего с выбранной моделью разрушения, не учитывающей ряд особенностей резины, например, диссипативных свойств, и абстрагирующейся от многих других факторов.

Тем не менее, для инженерных расчётов полученные соотношения дают удовлетворительное совпадение теоретических и экспериментальных результатов, особенно для случаев длительной эксплуатации машин.

Следует отметить, что в инженерной практике изменение амплитуды колебаний вибромашин при длительной их эксплуатации явление довольно частое. Так, например, в двухмассном уравновешенном виброконвейере типа G 48 для транспортировки сыпучих материалов за 11000 часов эксплуатации амплитуда колебаний уменьшилась с 11 мм до 7,5 мм, что привело к уменьшению производительности конвейера. Аналогичные изменения наблюдались при длительной эксплуатации вихревых смесителей: жёсткость виброизоляторов за 16 лет увеличилась на 60 %, а диссипация резины уменьшилась более чем в 4 раза [7]. На практике это нежелательное явление обычно устраняют изменением частоты колебаний привода или, в случае чрезмерного увеличения жёсткости, заменой элементов упругой подвески.

В ряде случаев вибросистемы (например, вибрационные конвейеры, грохоты, питатели) устанавливаются в специальных цехах и являются частью технологического процесса без постоянного присутствия людей-операторов в цехе (обычно это наблюдается при переработке пылящих, токсичных, радиоактивных и др. материалов). В этом случае надёжность вибросистем должна быть достаточно высокой, т.к. выход их из строя может привести к тяжёлым последствиям как в смысле нарушения технологического процесса, так и в смысле нарушения охраны труда.

Выход из строя таких вибросистем, особенно машин, работающих в околорезонансной области, возможен вследствие неконтролируемого диссипативного терморазогрева эластомерных элементов, преимущественно в случае применения упругого привода; результатом этого будет повышение диссипации энергии и снижение модуля упругости, т.е. снижение жёсткости упругих связей в целом и, следовательно, при фиксируемой частоте будет наблюдаться повышение амплитуды колебаний вибросистемы. Такое повышение амплитуды может привести к отказу всей системы упругой подвески и к аварийному выходу машины из строя. Правильный расчёт и установка средств автоматического контроля позволяют избежать таких аварий.

Более распространёнными являются случаи изменения жесткостных и диссипативных характеристик упругих элементов машин вследствие эффектов старения; особенно это касается машин, установленных на перекрытиях сооружений.

В этом случае параметры вибросистемы (например, амплитуда колебаний) могут выйти за пределы допускаемых значений, и это может привести к повышенной вибронагруженности перекрытий, к повышенному влиянию вибраций на операторов, а в ряде случаев и к авариям [7].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Walpole, L.I. On bounds for the overall elastic moduli of inhomogeneous system – I / L.I. Walpole // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1966. V. 14, № 3. P. 151-162. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-5096(66)90035-4
2. Walpole, L.I. On bounds for the overall elastic moduli of inhomogeneous system – II / L.I. Walpole // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1966. V. 14, № 5. P. 289-301. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-5096(66)90025-1
3. Чудновский, А.И. О разрушении макротел / А.И. Чудновский // Исследования по упругости и пластичности. Ленинград: Изд-во Ленинградского университета, 1973. С. 3-41.
4. Вакуленко, А.А. О связях между напряжениями и деформациями в неупругих средах / А.А. Вакуленко // Исследования по упругости и пластичности. Л.: 1961. № 1. С. 3-35.
5. Акивис, М.А. Тензорное исчисление / М.А. Акивис, В.В. Гольберг. М.: Наука, 1969. 352 с.
6. Прикладная механика упруго-наследственных сред: В 4-х томах / А.Ф. Булат, В.И. Дырда [и др.]. – Т. 1. Механика деформирования и разрушения эластомеров. К.: Наук. думка, 2011. 568 с.
7. Present problems of vibration isolation in heavy mining machines at long-term cyclic loads / V. Dyrda, A. Kobets, Ie. Bulat, S. Slobodian, M. Lysytsia, S. Sokol, V. Lapin, H. Ahaltsov // E3S Web Conf., 2020. 168, 00042. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800042

REFERENCES

1. Walpole, L.I. (1966), “On bounds for the overall elastic moduli of inhomogeneous system – I”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 14, no. 3, pp. 151-162. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-5096(66)90035-4
2. Walpole, L.I. (1966), “On bounds for the overall elastic moduli of inhomogeneous system – II”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 14, no. 5, pp. 289-301. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-5096(66)90025-1
3. Chudnovskii, A.I. (1973) “About the destruction of macrobodies”, *Resilience and ductility studies* [Issledovaniia po uprugosti i plastichnosti], Leningrad: Izdatelstvo Leningradskogo universiteta, P. 3-41.
4. Vakulenko, A.A. (1961), ”O sviaziakh mezhdu napriazheniiami i deformatciiami v neuprugikh sredakh”, *Studies on elasticity and plasticity* [Issledovaniia po uprugosti i plastichnosti], Leningrad, No 1, P. 3-35.
5. Akivis, M.A. and Golberg V.V. (1969), *Tenzornoe ischislenie* [Tensor calculus], Nauka, Moskva.
6. Bulat, A.F., Dyrda, V.I., Zvyagilskiy, Ye.L. and Kobets, A.S. (2011), *Prikladnaya mekhanika uprugo-nasledstvennykh sred. Tom 1. Mehanika deformirovaniia i razrusheniia elastomerov* [Applied mechanics of elastic-hereditary media. Vol. 1. Mechanics of deforming and breaking down of elastomers], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.
7. Dyrda, V., Kobets, A., Bulat, Ie., Slobodian, S., Lysytsia, M., Sokol, S., Lapin, V. and Ahaltsov, H. Present problems of vibration isolation in heavy mining machines at long-term cyclic loads. *E3S Web Conf*. 2020. 168. 00042. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800042

Об авторе

Агальцов Геннадий Николаевич, инженер, младший научный сотрудник отдела механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), г. Днепр, Украина, ag.gena@gmail.com

About the author

Ahaltsov Hennadii Mykolaiovych, Master of Science, Junior Researcher of Department of Elastomeric Component Mechanics in Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Science of Ukraine, Dnipro, Ukraine, ag.gena@gmail.com

Анотація. Розглядається алгоритм визначення зміни основних фізико-механічних характеристик пружних елементів машин, що працюють при тривалих циклічних навантаженнях в умовах гірничо-металургійного виробництва. Такі навантаження призводять до істотної зміни структури матеріалу під час експлуатації. В кінцевому підсумку це призводить до накопичення пошкодженості і до зміни макрохарактеристик матеріалу: модуля зсуву G і коефіцієнта дисипації ψ.

До таких машин відносяться грохоти, живильники, вибивні решітки, центрифуги, жатки, вібраційні машини сільськогосподарського виробництва і т.д. Механічні властивості гумових елементів таких машин не залишаються постійними в процесі навантаження, а їх зміни зазвичай призводять до зміни параметрів коливань рухомих частин машин, а іноді і до зміни технологічного процесу. При цьому дуже важливим є накопичення пошкодженості в масиві гумової деталі.

Пошкоджений матеріалу є першопричиною втрати будь-яким виробом працездатності, що в кінцевому підсумку призводить до його відмови. У зв’язку з цим формування характеристик гумових елементів конструкцій, як функції пошкодженості, що розвивається, є актуальним завданням, яке представляє науковий і практичний інтерес.

Для її вирішення використовується розроблений для композитних матеріалів метод Валпола, що дозволяє визначати ефективні (усереднені по деякому обсягу гумового масиву) характеристики з урахуванням пошкодженості, що розвивається в матеріалі.

Для розрахунку застосовується наступна модель втомного руйнування. Досліджуваний гумовий елемент представляється сукупністю матеріальних точок (або характерних об'ємів), кожна з яких наділена властивостями вихідного матеріалу. Процес накопичення і розвитку мікропошкоджень в матеріалі під дією зовнішніх навантажень інтерпретується як утворення в початково однорідному матеріалі деяких областей, що мають через свою ізольованість характер включень. Передбачається, що властивості всіх включень ідентичні між собою, але істотно відмінні від властивостей основного матеріалу.

На підставі цієї моделі були визначені дві основні інформаційні макроскопічні характеристики гуми: модуль зсуву і модуль втрат (коефіцієнт дисипації) в залежності від функції пошкодження матеріалу. У роботі розглядається алгоритм визначення довговічності гумових елементів на основі узагальненого критерію руйнування; цей критерій дозволяє зв'язати в єдине ціле мікро- і макрохарактеристики матеріалу. Отримано рівняння для критерію структурної стійкості гумових елементів при тривалих циклічних навантаженнях. Показано, що теоретичні дані добре узгоджуються з експериментом: для конкретної системи вихрових змішувачів аглофабрик час виходу характеристик жорсткості за межі допустимих значень отримано в межах 10-12 років, що добре узгоджується з практикою.

Ключові слова: диссипація, метод Валпола, мікропошкодження, узагальнений критерій руйнування, пружні елементи

Abstract. An algorithm for determining changes in the basic physical and mechanical characteristics of elastic elements of machines operating under long-term cyclic loads in conditions of mining and metallurgical production is considered. Such loads lead to a significant change in the structure of the material during operation. Ultimately, this leads to the accumulation of damage and to a change in the macro-characteristics of the material: shear modulus *G* and dissipation coefficient ψ.

These machines include screens, feeders, knock-out screens, centrifuges, headers, vibrating machines for agricultural production, etc. The mechanical properties of the rubber elements of such machines do not remain constant during loading, and their changes usually lead to a change in the vibration parameters of the moving parts of the machines, and sometimes to a change in the technological process. In this case, the accumulation of damage in the mass of the rubber part is very important.

Damage to the material is the root cause of the loss of any product's performance, which ultimately leads to its failure. In this regard, the formation of characteristics of rubber structural elements, as a function of developing damage, is an urgent task of scientific and practical interest.

To solve it, the Walpole method developed for composite materials is used, which makes it possible to determine the effective (averaged over a certain volume of a rubber mass) characteristics taking into account the damage developing in the material.

The calculation uses the following fatigue failure model. The investigated rubber element is represented by a set of material points (or characteristic volumes), each of which is endowed with the properties of the initial material. The process of accumulation and development of microdamages in the material under the action of external loads is interpreted as the formation in the initially homogeneous material of some areas that have, due to their isolation, the nature of inclusions. It is assumed that the properties of all inclusions are identical to each other, but differ significantly from the properties of the starting material.

Based on this model, two main informational macroscopic characteristics of rubber were determined: shear modulus and loss modulus (dissipation coefficient) depending on the function of material damage. The paper considers an algorithm for determining the durability of rubber elements based on the generalized fracture criterion; this criterion makes it possible to combine the micro and macro characteristics of the material into a single whole. An equation for the criterion of structural stability of rubber elements under long-term cyclic loads is obtained. It is shown that the theoretical data are in good agreement with the experiment: for a specific system of vortex mixers of sinter plants, the time for the stiffness characteristics to go beyond the permissible values was obtained within 10-12 years, which is in good agreement with practice.

Keywords: dissipation, Walpole method, microdamages, generalized fracture criterion, elastic elements

Статья поступила в редакцию 13.02.2020
Рекомендовано к печати д-ром техн. наук В.И. Дырдой