УДК 624.04

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ

Киричевский В.В., д.т.н., профессор, Киричевский Р.В., к.т.н.,доцент, Мулик В.А., инженер

Запорізький державний університет

На основе разработанной трехмерной конечно-элементной математической модели для напряженно-деформированного состояния и температурных полей диссипативного разогрева для слабосжимаемых эластомеров проведен расчет долговечности сложных эластомерных объектов при сложном нагружении на основе энтропийного критерия и критерия разрушения по величине развивающейся в материале поврежденности.

Использование резиновых деталей и эластомерных конструкций является одним из основных признаков комфортабельности и надежности машиностроительной продукции. В последние годы наблюдается тенденция в обновлении, переориентации и насыщенности резиновыми деталями современных машин и их использования вместо традиционных металлических.

Эластомерные элементы конструкций относятся к вязкоупругим материалам и обладают специфическими особенностями реологического поведения: мгновенная упругость, высокоэластичность, релаксация, диссипативный разогрев, старение.

В этой связи возрастает потребность в достаточно обоснованных и эффективных методах расчета и прогнозирования долговечности. Оценка долговечности резинотехнических изделий (РТИ) на основе дорогостоящих натурных испытаний, не является удовлетворительным решение проблемы. В литературе рассматриваются два основных подхода в расчете долговечности РТИ: на основе энтропийного критерия [1-4]; на основе критерия разрушения по величине развивающейся в материале поврежденности [3,5-7].

В данной работе были использованы оба критерия для определения долговечности сложных эластомерных конструкций как с точки зрения геометрии, так и условий нагружения. Для определения напряженно-деформированного состояния использовались трехмерные конечные элементы [8,9], а для определения температуры диссипативного разогрева сингулярные трехмерные элементы [10] с учетом слабой сжимаемости эластомеров.

При определении долговечности энтропийным критерием принимается, что локальный объем деформируемого твердого тела разрушается при достижении приращением плотности энтропии некоторого критического значения ΔS^*, являющегося характеристикой материала:

$$\int_0^{t^*} S(t)dt = \Delta S^*, \qquad (1)$$

где S(t) - скорость изменения плотности энтропии, t^* - долговечность.

Критическое значение приращения плотности энтропии ΔS^* принимается в виде разности:

$$\Delta S^* = S(t^*) - S(0), \qquad (2)$$

здесь $S(t^*)$, S(0) - плотность энтропии в момент разрушения и начальный момент.

Критериальное уравнение при конкретном выражении скорости S(t) изменения плотности энтропии (1), (2), характеризующей процесс разрушения, при циклическом нагружении имеет следующий вид:

$$\int_0^{t^*} \left[\frac{uG \sin^2 \omega t}{\eta_0} \exp(k_2 u t^2 \sin^2 \omega t - k_1 t) - divq \right] dt = \Delta S_T T, \qquad (3)$$

где u - удельная потенциальная энергия деформации,

T - абсолютная температура,

η_0 - начальное значение коэффициента вязкости,

t - время,

ω - частота нагружения,

ΔS_T - критическое значение приращения плотности энтропии,

q - вектор скорости теплового потока,

G - модуль сдвига;

k_1, k_2 - постоянные.

Введем обозначение

$$I = \int_0^{t^*} \left[\frac{uG \sin^2 \omega t}{\eta_0} \exp(k_2 u t^2 \sin^2 \omega t - k_1 t) - divq \right] dt \quad (4)$$

Для решения уравнения (4) выполним численное интегрирование с помощью формулы трапеций

$$I = h\left[\frac{f(0) + f(t^*)}{2} + \sum_0^t f_i \right], \quad (5)$$

где неизвестным является верхний предел интегрирования - искомая долговечность.

Представим изменение интеграла I как функцию от времени

$$f(t^*) = \frac{uG \sin^2 \omega t}{\eta_0} \exp(k_2 u t^2 \sin^2 \omega t - k_1 t) - divq \quad (6)$$

и, преобразуя уравнение (3) с учетом (6), получим следующее уравнение

$$f(t^*) - \Delta S_T T = 0. \quad (7)$$

Решая нелинейное уравнение (7), определим долговечность - t^*. Критический уровень энтропии можно найти по эмпирической формуле:

$$\Delta S_T = a \exp[b(T_H - T_0)], \quad (8)$$

где a и b - постоянные коэффициенты, $T_н = 293K$, T_0 - расчетная температура.

Для получения истинного времени до разрушения необходимо умножить полученную долговечность - t^* на коэффициент температурно-временного сдвига - a_T, определяемый по следующей формуле

$$\lg a_T = -\frac{c_1(T_0 - T,)}{c_2 + T_0 - T,}, \quad (9)$$

здесь $c_1 = 12$; $c_2 = 101{,}6$ K. c_1 и c_2 определены из эксперимента на ползучесть при разных температурах для резины.

Для определения долговечности РТИ используется следующий алгоритм расчета: определение термосилового состояния конструкции, определение опасной точки, решение критериального уравнения в опасной точке. Энтропийный критерий обладает преимуществами в том, что позволяет вести расчет для любого характера разрушения, имеется возможность учесть как механические, так и немеханические воздействия, отвечает требованию инвариантности.

Определения долговечности на основе критерия разрушения по величине развивающейся в материале поврежденности, является перспективным, так как он наиболее точно отражает физическую сущность разрушения. Этот критерий включает в себя макроструктурные и микроструктурные характеристики материала. Но все же он имеет определенные ограничения из-за отсутствия полной информации о кинетике поврежденности для различных режимов нагружения. Многофакторные внешние воздействия и многообразие физических моделей разрушения эластомеров вызывает необходимость комплексного анализа процессов накопления повреждений.

Считают, что в некотором макрообъеме материала возникают увеличивающиеся со временем пустоты, уменьшающие его эффективное поперечное сечение при неизменной геометрии. Для описания этого явления вводится параметр поврежденности - w. Задание поврежденности как внутренней переменной предполагает формулировку для нее соответствующих уравнений. Они могут быть обобщены дифференциальным уравнением вида:

$$dw=f_t(\sigma(t)\omega(t),c_i)dt, \qquad (10)$$

где c_i - набор экспериментально определяемых коэффициентов. Для конкретизации функции f_t в (10) чаще всего используют:

уравнения Качанова [11]

$$\frac{d\omega}{dt} = D\left(\frac{\sigma}{1-\omega}\right)^k, \qquad (11)$$

уравнение Работнова [12]

$$\frac{d\omega}{dt} = D\left(\frac{\sigma}{1-\omega}\right)^k \frac{1}{\omega^{-\beta}}, \qquad (12)$$

уравнение Шестерикова [6]

$$\frac{d\omega}{dt} = D\left(\frac{\sigma}{1-\omega^r}\right)^k, \qquad (13)$$

уравнение Леметра [13]

$$\frac{d\omega}{dt} = D\left(\frac{\sigma}{1-\omega}\right)^k \frac{1}{(1-\omega)^q}, \qquad (14)$$

здесь k, r, β, D - экспериментально определяемые коэффициенты.

Согласно результатам исследований, проведенным в работе [14], существует предельная концентрация повреждений в объеме резины, при которой образец разрушается. Приращение предельной концентрации можно принять как константу материала, так как приращение оказалось, в рамках погрешности эксперимента, инвариантным относительно напряжения и температуры. В резинах при циклическом разрушении макротрещина может возникнуть только в том случае, если поверхность образца практически полностью повреждена и расстояние между субмикротрещинами меньше их размеров. К моменту разрушения образца большинство субмикротрещин перекрывается и это порождает макротрещину.

В работе [4] приведено следующее уравнение позволяющее определить время до разрушения:

$$t^* = \tau_0 \ln\frac{\Delta p_\infty}{\Delta p_\infty - \Delta p_{\text{пр}}} \exp\left[\frac{u_0 - \gamma(\sigma,T)\sigma}{kT}\right], \qquad (15)$$

где $\tau_0 = 10^{-13}$ с, $u_0 = 133{,}9\times 10^6$ Дж./кмоль, $k=8{,}32\times10^3$ Дж./(кмольК),

γ - функция, зависящая от напряжения - σ и температуры - T;

$$\gamma=a-(b+c\sigma)(T-T_1), \qquad (16)$$

здесь a, b, c, T - постоянные.

При определении долговечности натурных изделий величина $\ln\frac{\Delta p_\infty}{\Delta p_\infty - \Delta p_{\text{кр}}}$, принималась равной 3.5 для образцов с температурой диссипативного разогрева до 323К и 4.5 с температурой свыше 323К.

Приведем некоторые задачи по определению долговечности РТИ. Решение задач осуществлялось по вышеизложенной методике, которая реализована на PC составной частью пакета прикладных программ «МІРЕЛА»[15].

Задача1. Расчет долговечности трапециевидного амортизатора.

Трапециевидный амортизатор с отверстием (рис.1) устанавливается в качестве виброизолятора под двигатели автомобилей марок ЗАЗ, ГАЗ и УАЗ. Работая в динамическом режиме, амортизатор разогревается в результате диссипации энергии. Он располагается под углом $\varphi = 45^\circ$ и поэтому испытывает сложную деформацию - сжатие со сдвигом (рис. 2). Расчет долговечности амортизаторов

сложной формы и при сложном нагружении становится возможным только в трехмерной постановке с применением МКЭ.

Исходные данные: a_1 = 0,029 м, a_2 = 0,035 м, b = 0,048 м, h = 0,03 м, R = 0,006 м, $tg\gamma_1$ = 0,29117, $tg\gamma_2$ = 0,47059, на поверхностях амортизатора происходит теплообмен с металлической арматурой и окружающей средой (воздухом) соответственно с коэффициентами H_1 и H_2; термоупругие постоянные и параметры релаксации: μ_0 = 1,27 МПа, ν = 0,499999, λ = 0,293 Вт/(м к), H_1 = 5240 $м^{-1}$, H_2 = 40 $м^{-1}$, α = -0,6, β=1,11, χ=0,64. Степень деформации по оси z составляет 5 %. Расчетная долговечность составила - 5,3 года.

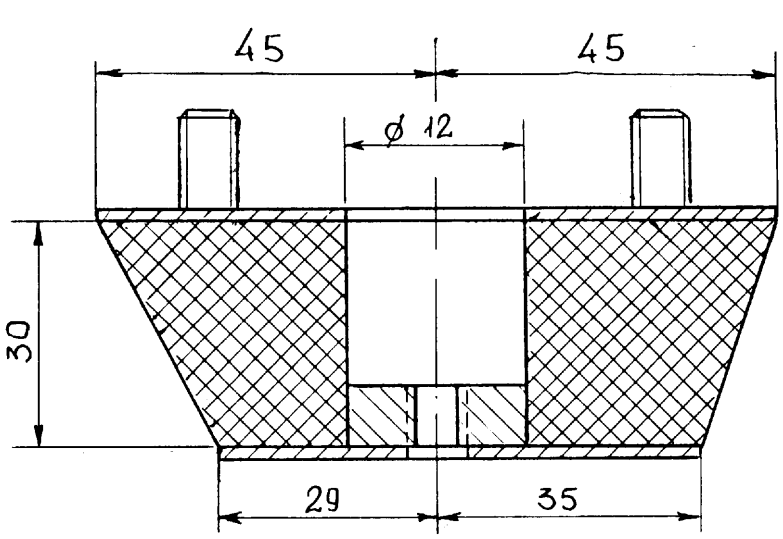


Рис. 1. Трапециевидный резинометаллический амортизатор с отверстием

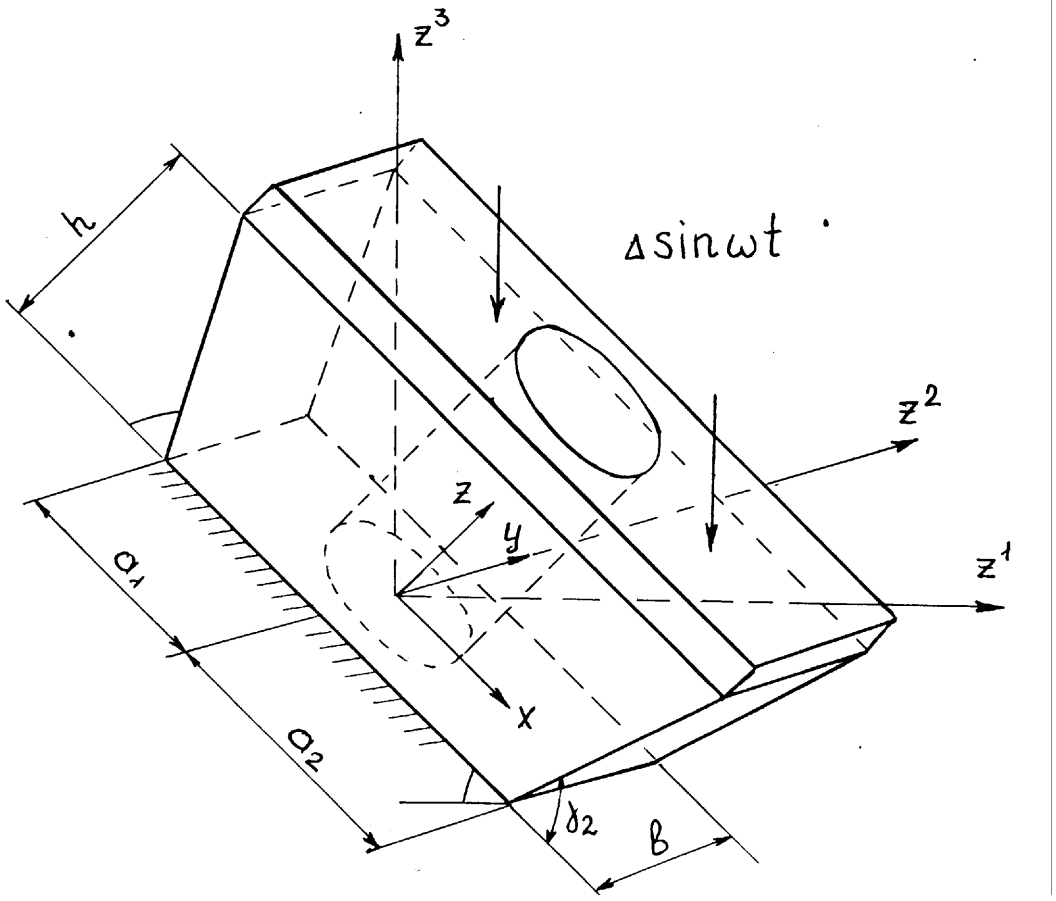


Рис.2. Схема нагружения и установки амортизатора

Задача 2. Расчет долговечности прямоугольного амортизатора.

Исходные данные взяты из статьи В.В. Губанова [16]. Материал детали предполагается изотропным, однородным, стареющим. Размеры амортизатора l=0,028м, b=0,108м, h=0,032м. Нагрузка P = 100 кгс, коэффициенты теплообмена между амортизатором и окружающей средой в направлении осей x, y, z соответственно - $H_1 = H_2 = 40 м^{-1}$, $H_3 = 5240 м^{-1}$, коэффициент поглощения резины $\psi = 0,2$, частота гармонического возбуждения f = 40 Гц. Согласно статье истинное время до разрушения - 0,47 года, а расчетное значение долговечности составило - 0,49 года. На рис.3 и рис.4 приведены графики зависимости долговечности от режимов нагружения, полученные на основании расчетов.

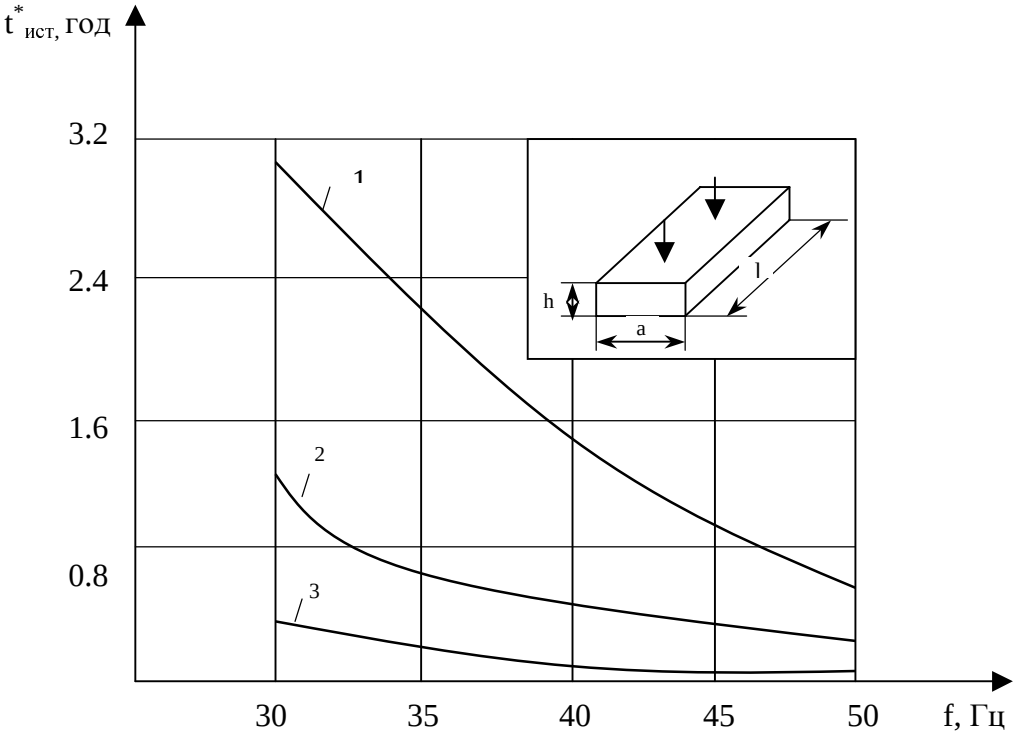


Рис.3 Зависимость долговечности от частоты: при амплитуде нагружения 1-5%, 2-6%, 3-7%.

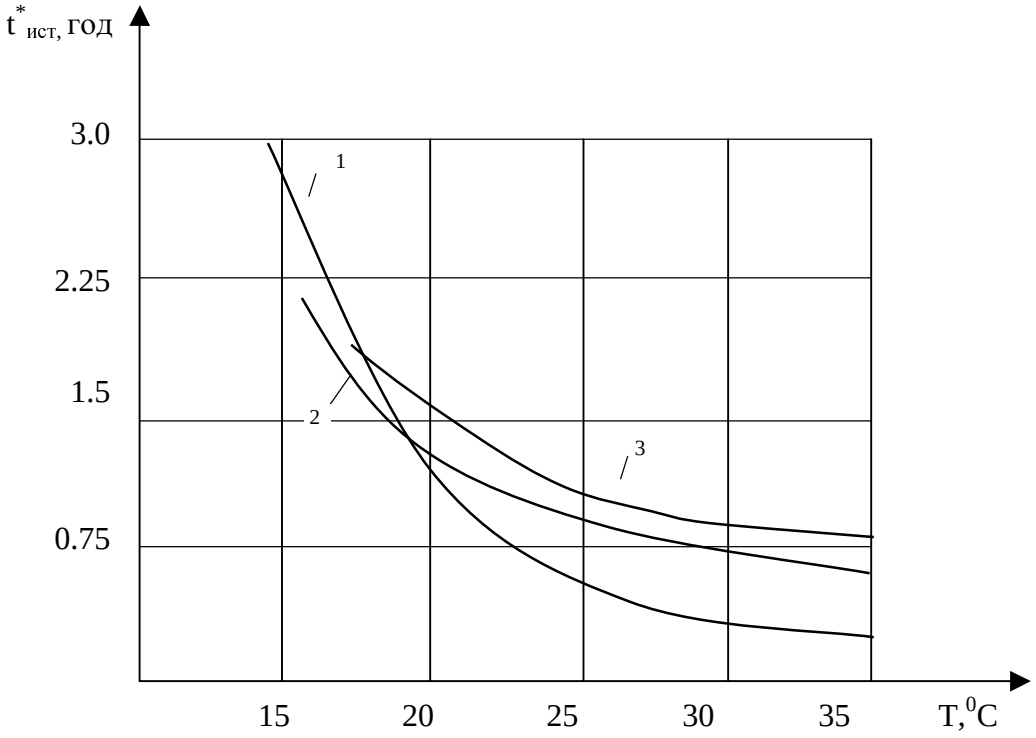


Рис.4 Зависимость долговечности от температуры: при частоте нагружения 1-30Гц, 2-35Гц, 3-40Гц.

Задача 3. Определение срока службы подушки задней опоры двигателя ЗИЛ-130.

Конструкция представляет собой полый резинометаллический цилиндр (рис.5). Расчет производился при следующих данных: $r_1 = 0.9 \cdot 10^{-2}$м, $r_2 = 2.6 \cdot 10^{-2}$м, $h = 1.7 \cdot 10^{-2}$м, максимальное перемещение верхней пластины под действием нагрузки - $0.85 \cdot 10^{-3}$м, частота гармонического возбуждения f = 5Гц, параметры релаксации $\alpha = -0.6$, $\beta = 1.11$, $\chi = 0.64$, модуль сдвига резины $\mu = 1.27$ МПа. При данных условиях нагружения расчетная долговечность составила - 0.45 года. На рис. 6, 7, 8 представлены графики зависимости долговечности от условий нагружения и температуры.

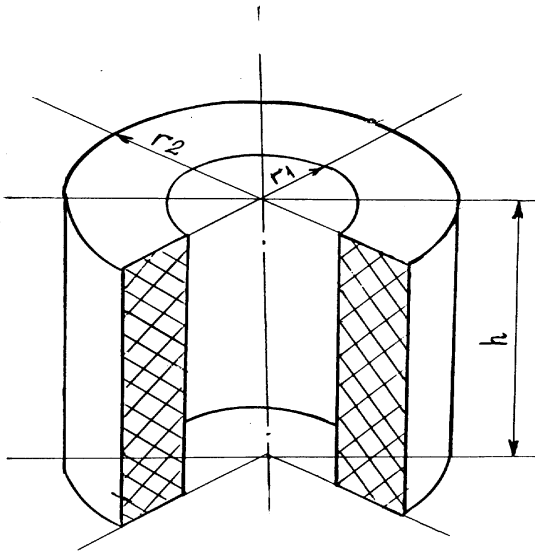
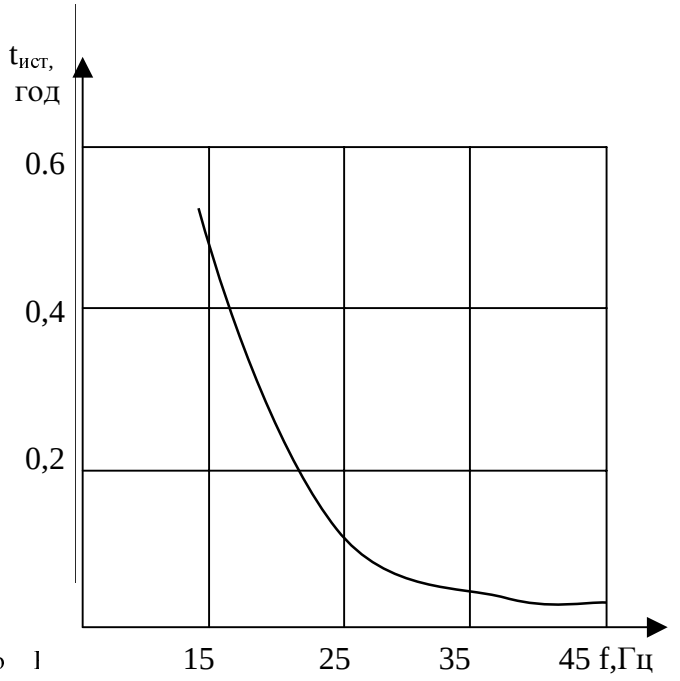


Рис.5. Расчетная схема цилиндрического амортизатора



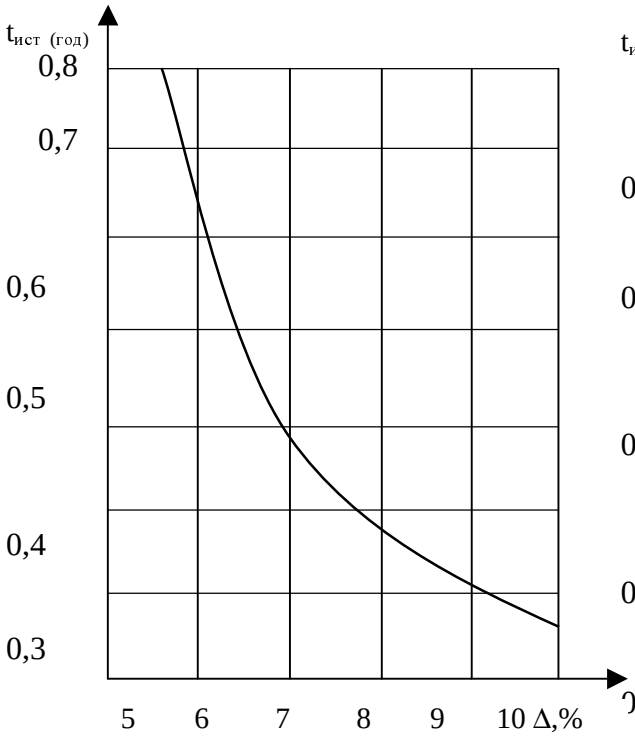


Рис.7. Зависимость долговечности опоры от амплитуды нагружения

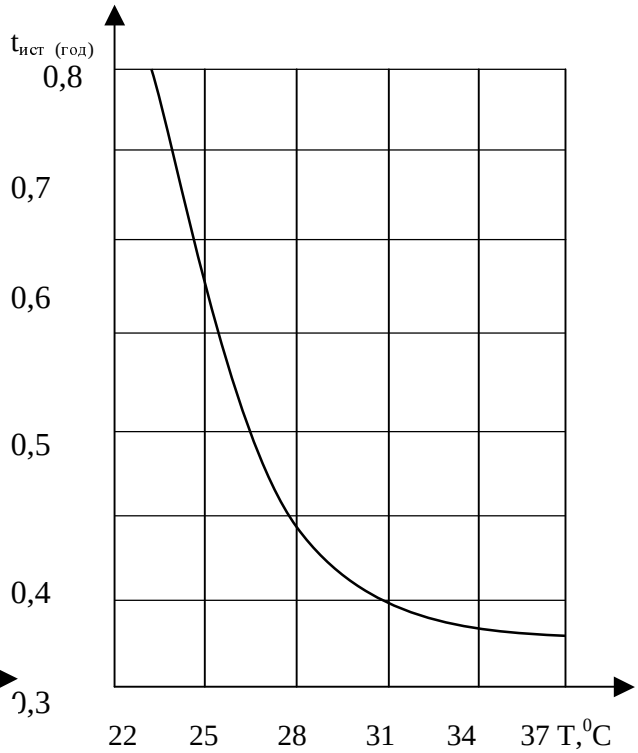


Рис.8. Зависимость долговечности опоры от температуры диссипативного саморазогрева

Задача 4. Расчет долговечности резиновой пластинки при циклическом растяжении.

Резиновая пластинка нагружается по схеме, показанной на рис.9. Рассчитывалась пластинка с длиной рабочей части H=0,05 м, шириной 0,02 м и толщиной L=50 мкм, циклически деформируемой при амплитуде 0,01 м, частоте 9,2 Гц и отсутствии предварительного растяжения. Расчетная долговечность составила - $6{,}1 \times 10^4$ с. В ходе экспериментов для партии образцов получено время до разрушения (5-7) $\times$ 10^4 с [17], как видно совпадение расчетных и экспериментальных данных удовлетворительное.

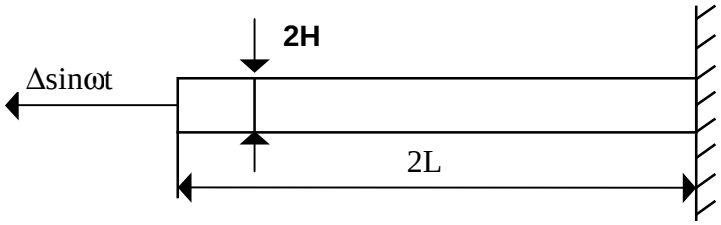


Рис. 9 Расчетная схема резиновой пластинки.

Задача 5. Определение времени до локального разрушения резинового элемента сдвига типа БРМ102 .

Элемент изготовлен из резины марки 1562 (рис.10), термоупругие постоянные и параметры релаксации : μ= 0,51 Мпа; ν= 0,49; α= - 0,6; β= 0,91 ; χ= 0,35. Размеры амортизатора l = 0.2 м., b=0.1м., h=0.05 м.

Из расчета напряженно-деформированного состояния и температурного режима по формуле (15) определили время до разрушения - 30660 часов. Экспериментально для партии БРМ102 предел наработки до появления магистральной трещины составляет 30000 - 35000 часов. На рис.11 приведена диаграмма расчетной долговечности элемента БРМ102 для различных марок резин.

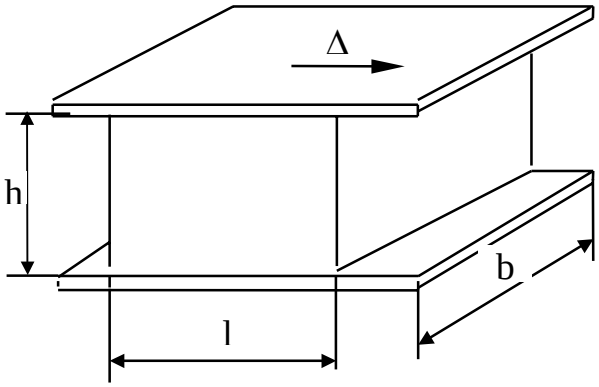


Рис.10. Элемент сдвига БРМ 102

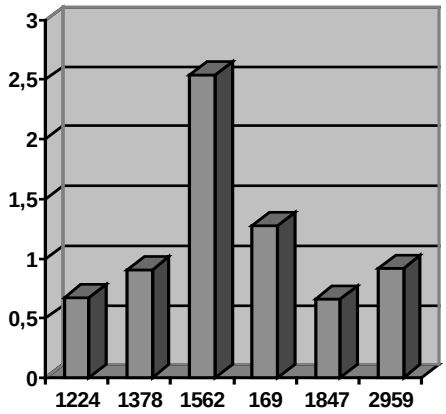


Рис. 11. Зависимость долговечности элемента БРМ102 от марки резины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленников В.Г., Лавендел Э.Э. Энтропийный критерий долговечности силовых резино-технических деталей // Механика полимеров. – 1975. - №2. - С.241-247.
2. Гольденблат И.И., Бажанов В.Л., Копнов В.А. Энтропийный принцип в теории прочности полимерных материалов // Механика полимеров. - 1976. - №1. - С.113-121.
3. Дырда В.И. Прочность и разрушение эластомерных конструкций в экстремальных условиях. - К.: Наукова думка.-1988.-232с.
4. Потураев В.Н., Дырда В.И., Круш И.И. Прикладная механика резины. К.: Наук. думка, 1980. - 260 с.
5. Голуб В.П. Нелинейные модели накопления повреждений в условиях ползучести // Пробл. машиностроения и автоматизации. - 1992. - №1. - С. 51-58.
6. Голуб В.П., Романов А.В. О кинетике поврежденности изотропных материалов в условиях ползучести // Прикл. механика. - 1989. - № 12. - С. 107-115.
7. Киричевский В.В., Мулик В.А. Прогнозирование срока службы эластомеров на основе критерия по развивающейся в материале поврежденности. –Труды восьмого симпозиума «Проблемы шин и резинокордных материалов. Дорога, шина, автомобиль». Изд-во НИИ шинной промышленности. М., 1997. – Т.2. - С.247-253.

8. Киричевский В.В., Сахаров А.С. Нелинейные задачи термомеханики конструкций из слабосжимаемых эластомеров. - К.: Будівельник, 1992. - 215с.
9. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г. Метод конечных элементов в механике разрушения эластомеров.-К.: Наукова думка, 1998. - 200с.
10. Киричевский Р.В. Численное моделирование температурных полей диссипативного разогрева конструкций из эластомеров с трещинами. – К.: Наукова думка, 1998. - 118с.
11. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. - М.: Наука, 1974. - 312с.
12. Работнов Ю.П. Ползучесть элементов конструкций. -М.: Наука, 1966. - 752 с.
13. Lemaitre J. Coupled Elasto -Plasticity and Damage Constitutive Equations // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. - 1985. -№ 51. - P. 31 - 49.
14. Дырда В.И., Веттегрень В.И., Надутый В.П. О молекулярном механизме износа резин // Каучук и резина -1976. - № 4. - С.26-28.
15. Система «МІРЕЛА" для исследования прочности, долговечности и разрушения конструкций из эластомерных композитных материалов в условиях нелинейного деформирования на основе метода конечных элементов. Киричевский В.В., Дохняк Б.М., Козуб Ю.Г., Киричевский Р.В., Карпушин А.Д. Гребенюк С.Н.- Труды Международной конференции». Прогрессивная техника и технология машиностроения и сварочного производства», К.: Изд -во КПИ. - 1998. – Т.3. - С. 136-139.
16. Губанов В.В. Прогнозирование срока службы резинотехнических изделий, работающих при циклических деформациях // Вопр. динамики и прочности. – 1982. - Вып.40. - С.21-33
17. Каминский А.А. Долговечность вязко-упругих пластин с трещинами // Прикладная механика. - 1980. - Том XVI. - № 5. - С. 85 - 90.