

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
КЫРГЫЗСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. И. РАЗЗАКОВА

На правах рукописи
УДК 658

Бегалиев Улугбек Турдалиевич

РАСЧЕТ ТОНКОСЛОЙНЫХ
РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
КОНСТРУКЦИЙ

Специальность: 01.02.04 - Механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бишкек - 2005

Работа выполнена на кафедре «Механика и мехатроника» Кыргызского национального технического университета им. И. Разакова.

Научный руководитель: член-корреспондент НАН КР,
доктор технических наук, профессор,
Т.О. Ормонбеков

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
В.Н. Свиденко,
кандидат технических наук,
Ж.Ш. Кожобаев

Ведущая организация: Кыргызско-Российский (славянский)
университет

Защита состоится « 25 » марта 2005г. в 12.00 час. на заседании Диссертационного совета Д.01.05.267 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук в Кыргызском национальном техническом университете им. И. Разакова по адресу: 720044, Кыргызская Республика, г.Бишкек, пр.Мира, 66.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Кыргызского национального технического университета им. И. Разакова.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим направлять в адрес по месту защиты диссертации.

Автореферат разослан « 24 » февраля 2005г.

Ученый секретарь
Диссертационного
совета, к.т.н., доцент

А.С. Иманкулова

Общая характеристика работы

Настоящая работа посвящена исследованию и расчету тонкослойных резинометаллических элементов (ТРМЭ) конструкций для определения напряженного состояния и жесткости ТРМЭ при воздействии различных внешних нагрузок, в том числе сейсмических.

Актуальность темы исследования. Расчет резинометаллических элементов обычно проводят в предположении о несжимаемости резины. Такой подход оправдан для массивных элементов, но для тонких слоев резины ТРМЭ, стесненных кинематическими граничными условиями на лицевых поверхностях, не применим.

Использование активных систем сейсмозащиты в виде ТРМЭ снижает усилия, возникающие в конструкциях зданий от воздействия сейсмических нагрузок. Экономическая эффективность и надежность систем активной сейсмозащиты делает наиболее перспективным использование разных конструктивных решений зданий и сооружений, основанных на этом принципе.

Вместе с тем, в данной области остаются еще не изученные или недостаточно изученные вопросы, представляющие значительный научный и практический интерес. В частности, к ним относятся: упрощение пространственных краевых задач расчета резиновых элементов, учет сжимаемости резины, напряженно-деформированное состояние и жесткость ТРМЭ от воздействия сейсмических нагрузок и т.д. Рассмотрение этих вопросов, позволяющих углубить понимание и повысить возможности теоретического исследования происходящих в конструкциях процессов, а также возможность массового применения ТРМЭ в практике, имеют своевременную необходимость.

Вышесказанное определяет цели настоящей диссертации: создание модели ТРМЭ, определение напряженного состояния и жесткости ТРМЭ при воздействии внешних сил, в том числе сейсмических, и применение их к решению практических задач.

Для достижения цели поставлены следующие задачи исследований:

- аналитическое решение задач расчета резинометаллических элементов на сжатие, изгиб и сдвиг;
- разработка математической модели ТРМЭ для определения напряженно-деформированного состояния и жесткости;
- определение напряженного состояния ТРМЭ при сейсмических нагрузках;
- разработка алгоритма оценки напряженно-деформированного состояния ТРМЭ при сейсмических нагрузках;
- определение диссипативных и демпфирующих свойств ТРМЭ;

Научная новизна предлагаемой работы состоит в том, что в ней:

1. Определены и решены краевые задачи, отражающие жесткость деформируемых резинометаллических элементов с использованием гипотез о распределении напряжений в резиновом слое.

2. Разработана математическая модель ТРМЭ, где система уравнений состоит из уравнений деформации отдельных резиновых и жестких слоев, объединенных условиями упругого сопряжения на поверхностях контакта слоев.

3. Впервые разработан алгоритм оценки напряженно-деформированного состояния ТРМЭ при сейсмических воздействиях.

4. Определено напряженное состояние и жесткость ТРМЭ при воздействии внешних сил, в том числе сейсмической нагрузки.

5. Спроектирован и произведен промышленный образец ТРМЭ.

6. Определены демпфирующие и диссипативные свойства ТРМЭ.

Теоретическая и практическая значимости диссертации заключаются в том, что полученные в ней результаты позволяют более точно исследовать поведение резинометаллических элементов при сжатии, сдвиге, изгибе, вибрационном или сейсмическом колебаниях; рассматривать более сложные и реалистичные конструктивные схемы сооружений; конструировать и производить активные системы сейсмозащиты в виде ТРМЭ для повышения надежности конструкций зданий и сооружений при сейсмическом воздействии; конструировать системы виброизоляции машин и оборудования; исследовать массивные и тонкие резинометаллические элементы, а также эти результаты могут найти применение при решении ряда других научно-технических задач машиностроения и строительства.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы учтены институтом «КыргызНИИПостройства» при разработке строительных норм СНиП КР 31-01:2001 «Переоборудование помещений жилых зданий существующей застройки», СНиП КР 31-02-2000 «Инструкция по проектированию и застройке территорий, примыкающих к Бсык-Атинскому разлому г.Бишкек», СНиП КР 20-02:2004 «Сейсмостойкое строительство. Нормы проектирования», «Рекомендаций по применению тонкослойных резинометаллических элементов для сейсмоизоляции зданий и сооружений».

Апробация работы. Результаты работы по диссертации в целом были доложены на Конференции по сейсмостойкому строительству (Бишкек, 2000), Международной научно-практической конференции «Современное состояние и перспективы развития строительной науки» (Бишкек, 2000), Седьмом и Восьмом Международных семинарах «Сейсмоизоляция, диссипация пассивной энергии и активный контроль вибраций сооружений» (Ассиси, 2001 и Ереван, 2003), Республиканской научно-практической конференции «Проблемы строительной отрасли и пути их решения» (Бишкек, 2001), научно-практическом семинаре «Особенности прогнозирования и строительства горных поселков в Кыргызской Республике с учетом региональных природно-климатических условий» (Бишкек, 2002), Международной конференции «Современное состояние сейсмостойкого строительства» (Алматы, 2004), Научной сессии МИФИ (Москва, 2004).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в работах [1-9].

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 177 названий и четырех приложений. Объем работы составляет 150 страниц, в том числе 23 рисунка на 23 страницах и 6 таблиц на 6 страницах.

Краткое содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, дается краткий обзор литературы, формулируются вопросы, не изученные или мало изученные ранее и представляющие собой предмет исследования в данной работе; перечислены положения, которыми определяется научная новизна настоящей диссертации.

В **первой главе** рассмотрено использование разных систем гипотез о распределении напряжений и применения принципа минимума дополнительной энергии.

В §1.1 при расчете цилиндрического элемента использована следующая схема решения задач: для удовлетворения дифференциальных уравнений в напряжениях выбраны по виду краевых условий и из условий симметрии уточнены функции напряжений в форме Морера по одной из переменных; далее с использованием свойства гармоничности среднего напряжения установлен конкретный вид функции Морера по второй переменной, значения произвольных постоянных которой найдены с применением принципа минимума дополнительной энергии.

В §1.2 дается методика, основанная на упрощении трехмерной задачи определения жесткости за счет привлечения в расчеты гипотез о распределении напряжений в отдельном резиновом слое резинометаллического элемента и использовании принципа минимума дополнительной энергии.

Рассматривается деформирование отдельного резинового слоя толщиной h в форме прямоугольной призмы (рис.1).

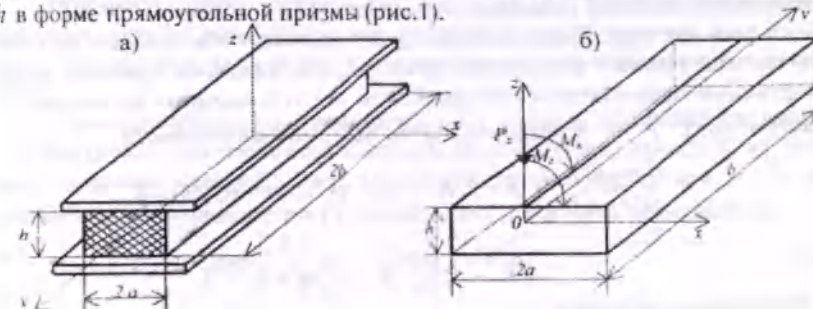


Рис.1 Прямоугольный резинометаллический элемент

В центре тяжести слоя введена декартова система координат ($-a \leq x \leq a$, $-b \leq y \leq b$, $-h/2 \leq z \leq h/2$), где плоские торцы слоя $z = \pm h/2$ приклеены к абсолютно жесткому элементу, воспринимающему внешние нагрузки, которые сводятся к осевой сжимающей силе P_z и изгибающему моменту M_x (M_y).

Следуя известным гипотезам В.Л. Бидермана, напряженное состояние резинового слоя определяется наложением сдвигов σ_{xz} и σ_{yz} при $\sigma_{xy} = 0$ и гидростатического давления $p = p(x, y)$, представляющего по толщине слоя нормальные напряжения σ_{xx} и σ_{yy} .

В первой, второй и третьей системах гипотез приняты напряжения

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = p; \quad \sigma_{xy} = 0; \quad (1)$$

$$\sigma_{xx} = -z \frac{\partial p}{\partial x}; \quad \sigma_{yy} = -z \frac{\partial p}{\partial y};$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = p; \quad \sigma_{zz} = q(x, y); \quad \sigma_{xy} = 0; \quad (2)$$

$$\sigma_{xx} = -z \frac{\partial p}{\partial x}; \quad \sigma_{yy} = -z \frac{\partial p}{\partial y};$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = p; \quad \sigma_{zz} = q + \frac{z^2}{2} \nabla^2 p; \quad \nabla^2(\cdot) = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right)(\cdot); \quad (3)$$

$$\sigma_{xx} = 0; \quad \sigma_{yy} = -z \frac{\partial p}{\partial x}; \quad \sigma_{zz} = -z \frac{\partial p}{\partial y};$$

и получены уравнения определения сжимающей нагрузки и жесткости элемента, функционалы дополнительной энергии и функционал принципа минимума дополнительной энергии.

Для получения конкретных расчетных результатов в решении наиболее простой задачи, типичной для расчетов, и их сопоставления с известными данными, полученными посредством других подходов, приводится плоская задача о сжатии призматического слоя из несжимаемого материала.

Анализом результатов расчетов жесткости и их сопоставлением с другими данными установлено, что гипотезы (2) и (3) в сравнении (1) позволяют получить расчетные зависимости для расчета жесткости не только тонких, но и массивных (высоких) резиновых элементов.

В §1.3 для определения напряженного состояния и жесткости на сжатие призматического резинового слоя, сформулированы краевые задачи функции гидростатического давления $p(x, y)$ и расчетов зависимости "сила-осадка" $P_z - \delta_z$ в предположении объемной сжимаемости

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - \gamma^2 p = \gamma^2 K \frac{\delta_z}{h} m_1; \quad p(\pm a, y) = p(x, \pm b) = 0; \quad (4)$$

$$P_z = - \int_{-b}^b \int_{-a}^a \left(p \frac{m_1}{m} - 3G \frac{1}{m} \frac{\delta_z}{h} \right) dx dy; \quad (5)$$

и несжимаемости резины

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{12G}{h^2} \frac{\delta_z}{h}; \quad p(\pm a, y) = p(x, \pm b) = 0; \quad (6)$$

$$P_z^0 = - \int_{-b}^b \int_{-a}^a \left(p - 3G \frac{\delta_z}{h} \right) dx dy. \quad (7)$$

где $m_1 = 1 - 2\aleph$; $m = 1 + \aleph$; $\aleph = \frac{1}{3} \frac{G}{K}$; $\gamma^2 = \frac{12G}{mKh^2}$; G и K - модули сдвига и объемного сжатия.

Решение двумерной краевой задачи (4) можно получить в одинарных или двойных рядах по методу Фурье. После решения уравнений получена зависимость для расчета жесткости сжимаемого слоя:

$$(\Gamma 1) P_z = 3FG \frac{\delta_z}{h} \frac{1}{m} \left[1 + \frac{32 a^2 m_1^2}{\pi^2 h^2 m} \sum_{n=1,3,5} \left(1 - \frac{th \gamma_1 \frac{b}{a}}{\gamma_1 \frac{b}{a}} \right) \frac{1}{(n\gamma_1)^2} \right], \quad (8)$$

$$\text{где } F = 2a \cdot 2b; \quad \gamma_1^2 = \left(\frac{\pi n}{2} \right)^2 + \frac{12Ga^2}{mKh^2}.$$

Решением второго типа в одинарных рядах установлено

$$(\Gamma 2) P_z = 3FG \frac{\delta_z}{h} \frac{1}{m} \left[1 + \frac{32 a^2 m_1^2}{\pi^2 h^2 m} \times \sum_{n=1,3,5} \left(1 - \frac{th \gamma_2 \frac{a}{b}}{\gamma_2 \frac{a}{b}} \right) \frac{1}{(n\gamma_2)^2} \right]. \quad (9)$$

Ряды (8) и (9) сходятся, а двойной ряд

$$(\Gamma 3) P_z = 3FG \frac{\delta_z}{h} \left[1 + \frac{m_1^2}{4m} \left(\frac{4}{\pi} \right)^6 \frac{a^2}{h^2} \sum_n \sum_k \left[n^2 k^2 \left(n^2 + k^2 \frac{b^2}{h^2} + \frac{48}{\pi^2} \frac{Ga^2}{mKh^2} \right) \right]^{-1} \right] \quad (10)$$

в зависимости от каждого параметра дает общее решение напряженного состояния в любой точке в зависимости от координат.

Ряды (8) и (9), получившиеся в следствии расщепления двойного ряда (10) описывают напряженное состояние по всей площади элемента. С учетом тех же граничных условий в зависимости от отношения длины сторон $b > a$ используем (8), т.к. мы рассматриваем прямоугольную конструкцию.

При рассмотрении резины как несжимаемого материала общий ход решений задач не изменяется: все решения в рядах должны быть получены для краевой задачи (6) с последующими подсчетами усилия сжатия по (7).

В расчетах жесткости резинового слоя с учетом объемной сжимаемости материала при решении плоской задачи можно исходить из того, что, например, краевая задача (4) вырождается в задачу для $p(x, y)$, решение которой позволяет по (5) установить расчетную зависимость

$$P_z = 3FG \frac{\delta_z}{h} \frac{1}{m} \left[1 + \frac{m_1^2}{3} \frac{K}{G} \left(1 - \frac{th \gamma \frac{a}{h}}{\gamma \frac{a}{h}} \right) \right] \quad (11)$$

или

$$P_z = 2b \int_{-a}^a \left[G \frac{\delta_z}{h} \frac{1}{m} \left(3 + \frac{m_1^2}{m_2} \right) - p \frac{m_1}{m_2} \right] dx = FG \frac{\delta_z}{h} \left[\frac{1}{m} \left(3 + \frac{m_1^2}{m_2} \right) + \frac{m_1^2}{m_2} \frac{K}{G} \left(1 - \frac{th \gamma_1 \frac{a}{h}}{\gamma_1 \frac{a}{h}} \right) \right] \quad (11')$$

При расчетах элемента правомерность использования зависимости (11) или (11'), устанавливаемая сопоставлением с (8) и (9), наблюдается при $b/a \geq 12$, т.е. задачу расчета можно рассмотреть как плоской.

В решении задачи об изгибе первого типа после подстановок и соответствующих вычислений найдена зависимость для расчетов жесткости при изгибе резинового слоя призматического элемента

$$(Г1) M_y = FG\beta_y \frac{a^2}{mh} \left[1 + \frac{96 m_1^2 b^2}{\pi^2 m h^2} \times \sum_{n=1,3,5,\dots} \left[\frac{1}{3} + \frac{1}{\left(\gamma_2 \frac{a}{b}\right)^2} - \frac{c h \gamma_2 \frac{a}{b}}{\gamma_2 \frac{a}{b}} \right] \frac{1}{n^2 \gamma_2^2} \right]. \quad (12)$$

В решении задачи второго типа аналогично получены зависимости оценки жесткости для сжимаемого (несжимаемого) элемента.

Задача об изгибе цилиндрической шайбы рассмотрена в §1.4. Торцовые поверхности резинового слоя $z = \pm h/2$ поворачиваются одна относительно другой на угол β под воздействием изгибающего момента M , уравновешиваемого напряжениями срединной поверхности резины.

Найдена зависимость для расчетов жесткости шайбы из сжимаемого и несжимаемого материала на изгиб.

Для определения простейшей приближенной зависимости оценки жесткости шайбы на изгиб в решении задачи методом Ритца для $p(r, \varphi)$ принята одночленная аппроксимация $p = A \cos \varphi \left[r/b(r^2/b^2 - (1+\alpha^2) + \alpha) \right]$, что позволило

после подстановки этой функции в функционал и его минимизации по постоянной A найти ее значение.

Из полученных результатов следовали зависимости, пригодные для анализа напряженного состояния и жесткости резинового элемента при изгибе сплошного цилиндрического амортизатора

$$M_{из} = \beta G \frac{\pi b^4}{4mh} \left\{ 3 + m_1^2 \frac{K}{G} + \left[1 + \frac{8}{\gamma} \frac{4I_0(\gamma)}{\gamma I_1(\gamma)} \right] \right\}, \quad \gamma^2 = \frac{12 G b^2}{m K h^2} \quad (13)$$

$$M_{из}^0 = \beta G \frac{\pi b^4}{4h} \left(3 + \frac{1}{2} \frac{b^2}{h^2} \right); \quad (14)$$

$$M_{из} = \beta G \frac{\pi b^4}{4mh} \left[3 + \frac{1}{2} \frac{m_1^2}{m} + \left(1 + \frac{3}{4} \frac{G b^2}{m K h^2} \right)^{-1} \right] \quad (15)$$

Аналитическое решение задач об изгибе цилиндрического амортизатора получено с использованием гипотез для напряжений в отношении тонкого резинового слоя. Представленные результаты пригодны для расчетов ТРМЭ как с тонкими, так и с массивными (высокими) резиновыми слоями.

Во второй главе использованием сферической системы координат решены задачи определения напряженного состояния сферических и конических резинометаллических элементов, постановки которых с использованием гипотез сформулированы в главе 1. Задача об осевом сжатии сферического слоя усилием P_z осесимметрична, задача о боковом нагружении слоя усилием P_x - несимметрична. Поэтому и системы гипотез о распределении напряжений приняты различными в расчетах каждой задачи.

В третьей главе создана конструкция ТРМЭ. В §3.1 на примере плоско-го элемента рассмотрен принцип работы ТРМЭ (рис.2, а), который состоит из чередующихся, скрепленных между собой по всей площади контакта тонких слоев резины 1 и слоев жесткого материала 2 (например, металла).

Невысокий по сравнению с металлом модуль упругости резины, обеспечивающий ее хорошие амортизационные и компенсирующие свойства - существенный недостаток при обеспечении жесткой связи детали в одном или нескольких направлениях при сохранении свободы перемещений в других. Жесткость резины сравнима с жесткостью металлических стыков в одном направлении и очень мала в других направлениях.

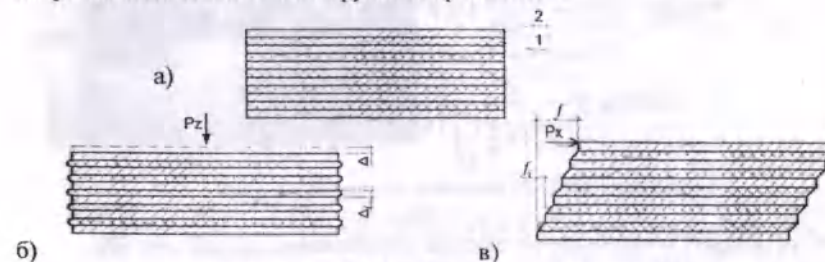


Рис.2. Плоский ТРМЭ (а), его сжатие (б) и сдвиг (в)

Такая анизотропия жесткости достигается в ТРМЭ использованием свойства объемной несжимаемости резины при большом коэффициенте формы (отношение площади опорной поверхности резинового слоя к площади его боковой поверхности).

Общая толщина ТРМЭ составляет:

$$H = t_p n + t_m (n+1), \quad (16)$$

где t_p и t_m - толщина слоев резины и металла; n - количество слоев резины.

Суммарная деформация сжатия и сдвига ТРМЭ равны

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \Delta_i = \Delta_p n, \quad (17)$$

$$f = \sum_{i=1}^n f_i = f_p n, \quad (18)$$

где Δ_i и f_i - деформации при сжатии и сдвиге одного слоя резины.

Характерное свойство ТРМЭ - его такая же податливость при сдвиге, как и сплошного резинового элемента с толщиной, равной суммарной толщине слоев резины ТРМЭ.

В §3.2 определены характеристики ТРМЭ. Исследования показывают, что расчет элементов, включающих отношение любого размера в плане к толщине слоя резины, исчисляемое несколькими десятками и сотнями, требует учета точного значения μ для резины, используемой в ТРМЭ.

По имеющимся данным, для наполненных резин значения μ отличаются от 0,5 ($\mu = 0,45 \div 0,49$).

Даже малые отклонения μ от 0,5 (влияние слабой сжимаемости) дают значительную поправку в зависимости «сила - осадка» для ТРМЭ и приводят к тому, что эта зависимость нелинейна даже при малой деформации. Т.к. нахождение точных решений для краевых задач - весьма сложно, то при расче-

те ТРМЭ были применены вариационные методы, наиболее эффективные при определении интегральных зависимостей «сила - осадка». Здесь рассмотрен плоский ТРМЭ на сжатие и использован для решения краевых задач в перемещениях для сжимаемых (несжимаемых) резиновых элементов функционал и из условия минимума получена зависимость «сила - осадка» в виде

$$P_z (Gab)^{-1} = 2,4\varepsilon \frac{1+YX^{-1}}{1+\frac{5Y}{4\kappa}} - 33\varepsilon^2 Z^2 \frac{Y}{X} \left[\frac{4+T}{2,4+T} + ZY \right] \frac{\alpha^2 + \rho^2}{\alpha^2 \rho^2} + 0,1425\varepsilon^3 Z^4 \frac{Y^2}{X \left(1 + \frac{5Y}{4\kappa}\right)^2} \left[\frac{Y}{\alpha^2 + \rho^2} + 0,9 \frac{\alpha^4 + \rho^4}{(\alpha^2 + \rho^2)^2} \right], \quad (19)$$

где

$$\varepsilon = \frac{5}{12} \frac{\alpha^2 \rho^2}{\alpha^2 + \rho^2}; \quad \alpha = \frac{a}{t_p}; \quad \rho = \frac{b}{t_p}; \quad X = 1 + \frac{1-2\mu}{\mu} Y; \quad Z = \frac{4,8+T}{2,4+T}; \quad T = \frac{\kappa}{Y}; \quad \kappa = \frac{G_M t_M}{G t_p}.$$

Далее приведены результаты экспериментов ТРМЭ. До изготовления ТРМЭ проведены испытания на разрыв имеющихся резин марок 3825, 2462, 871317, 2959 и 34 разной твердости и упругости. По методике размеры образцов были вырезаны длиной 150 ± 200 и шириной 8 ± 13 мм. В результате для изготовления цилиндрического ТРМЭ (рис.3) получена резина марки 3825.

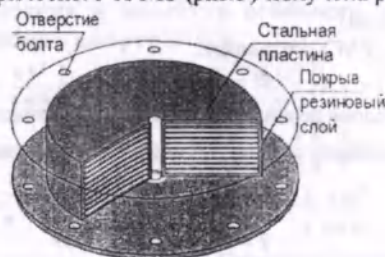


Рис.3 ТРМЭ

При изготовлении элемента, металл подвергался латунированию, и резина к металлу крепилась вулканизацией с предварительной обработкой металлических слоев клеем ФЭН-1. Размеры образца: толщина одного резинового слоя 3,8, металлического - 0,8, общая высота - 100, диаметр - 308; толщина опорных пластин - 10, диаметр - 408 мм.

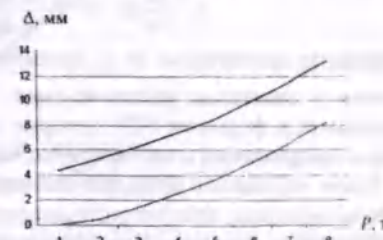
Жесткость при сжатии и сдвиге ТРМЭ рассматривалась в дифференциальной форме как отношение приращения силы сжатия или сдвига к соответствующему приращению деформации. Значения сжимающих и сдвигающих нагрузок на один элемент приняты от реальной массы конструкций зданий.

Деформационная характеристика ТРМЭ при нагружении на сжатие (рис.4) - нелинейная, жесткого типа (жесткость возрастает с увеличением нагрузки), причем степень нелинейности повышается при уменьшении толщины резины и увеличении твердости.

Результаты испытаний ТРМЭ на сдвиг показали, что деформационные характеристики - нелинейные мягкого типа (жесткость уменьшается при увеличении нагрузки).



а)



б)

Рис.4 Установка (а) и поведение (б) ТРМЭ при сжатии

Так как данные эксперимента хорошо согласуются с теорией, то можно рекомендовать применение формулы (19) для расчета ТРМЭ с отношением a/t_p и $b/t_p \geq 80$ и $t_p = (0,1 - 0,6)$ мм.

Зависимость жесткости сжатия K_z от удельной нагрузки сжатия P_z

$$K_z = P_z / F, \quad \text{кгс/см}^2, \quad (20)$$

где F - площадь опорной поверхности ТРМЭ, см^2 .

Жесткость сдвига K_s можно определить по формуле

$$K_s = \Delta P_s / \Delta f, \quad \text{кгс/см}, \quad (21)$$

где Δf - приращение деформации сдвига при увеличении силы сдвига на ΔP_s .

В §3.3 получена математическая модель ТРМЭ, позволяющая рассчитать жесткостные свойства решением задачи о деформации тонкого плоского упругого слоя, жестко сцепленного с двумя недеформируемыми лицевыми поверхностями, в виде разложения по параметру $\varepsilon = h/R$, где h - толщина слоя, R - характерный поперечный размер.

Основное уравнение статической теории упругости для перемещений

$$(1-2\nu)\Delta U + \text{grad div } U = 0, \quad (22)$$

где U - вектор перемещений, ν - коэффициент Пуассона, Δ - оператор Лапласа. В уравнении (22) граничные условия задаются в кинематическом виде на лицевых поверхностях.

Слабонаполненные резины обладают уникальным свойством: величина отношения $G/K = 1-2\mu$ мала и лежит в диапазоне $10^{-3} - 10^{-4}$ (G и K - модули сдвига и всестороннего сжатия). Данное обстоятельство позволяет получить асимптотическое разложение.

В этом случае лицевые поверхности остаются параллельными и после деформирования упругого слоя. Считается, что усилия на опору передаются через жесткие фланцы и деформацией изгиба можно пренебречь, и получаем

$$\Delta_s \bar{e}_0 - 12c \bar{e}_0 = -\frac{12c}{R} (\bar{W} - \bar{W}') \quad \text{и} \quad \bar{W}_0 = \zeta R \bar{e}_0 - \frac{R \cdot \zeta}{24c} (3-4\zeta^2) \Delta_s \bar{e}_0.$$

Итак, смещения и напряжения, соответствующие сдвигу и растяжению-сжатию становятся независимыми. Точнее, слагаемые в

$$\sigma_x = \frac{G}{h}(U^* - U^*) - \frac{G}{h} \frac{\partial \bar{\epsilon}_x}{\partial \xi}; \quad \sigma_y = \frac{G}{h}(V^* - V^*) - \frac{G}{h} \frac{\partial \bar{\epsilon}_y}{\partial \eta}, \quad (23)$$

содержащие производные от $\bar{\epsilon}_x$, соответствуют чистому растяжению-сжатию и вклада в сдвиговые усилия не дают. Эти усилия определяются первыми слагаемыми в формулах (23), которые не зависят от деформаций в вертикальном направлении и соответствуют чистому сдвигу.

Такое упрощение позволяет рассматривать деформации в динамической задаче независимо, если скорости деформаций не очень велики. Характерные частоты, при которых независимость движения нарушается, порядка $\omega_0 = 2\pi\nu/R$, где ν - скорость звука в резине.

Диапазон характерных частот ω для сейсмозащиты лежит в пределах нескольких герц, поэтому условие $\omega = \omega_0$ выполнено с большим запасом.

В §3.4 приведен пример расчета диаграммы сжатия ТРМЭ. Приняты следующие исходные значения ТРМЭ из 12 слоев: $a=0,4\text{см}$; $b=2,85\text{см}$; $h=0,1\text{см}$; $G=1,17\text{МПа}$; $K=2783\text{МПа}$; $n=10,155$; $m=4080$; $N=12$.

Расчеты выполнены в форме решения линейной задачи для полого цилиндра из: а) несжимаемого материала; б) слабосжимаемого материала.

Результаты отдельных расчетов отражены в табл.1.

Таблица 1

Результаты расчета диаграммы сжатия цилиндрического подшипника по модели физически нелинейной неоднородной среды

A	$\delta/h, 10^{-2}$	$\Delta/h = N\delta/h, 10^{-1}$	$\Delta = N\delta, \text{см}, 10^{-2}$	$P_s, \text{кг/с}$
0,1	1,259	1,516	1,516	1787,7
	1,365	1,637	1,637	1955,4
0,2	2,260	2,713	2,713	3575,0
	2,646	3,175	3,175	3910,7
0,3	3,473	4,167	4,167	5362,8
	3,527	4,232	4,232	5865,6

Диаграммам сжатия цилиндрического подшипника, построенным по данным табл.1, соответствуют кривые 1 и 2 на рис.5, где для сопоставления точками показаны экспериментальные результаты.

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов свидетельствовало, что для модели среды большая точность обеспечивается аппроксимирующей функцией из соответствующего линейного решения задачи для слабосжимаемого материала.

В целом, приведенные примеры расчетов достаточно свидетельствовали о достоверности результатов, получаемых на основе предложенных моделей физически нелинейных слабосжимаемых сред.

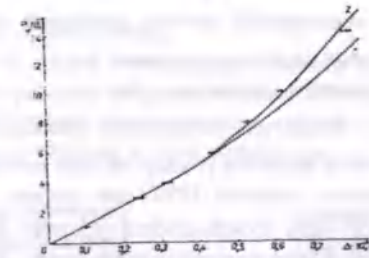


Рис.5 Сопоставление кривых сжатия ТРМЭ

В четвертой главе при построении модели ТРМЭ §4.1-4.3 ограничивается случаями: - отношение толщины резиновых слоёв к их линейным размерам намного меньше единицы $\epsilon = h/L \ll 1$; - отношение упругих модулей намного меньше единицы $G/K \ll 1$, где $G = 1,34 \text{ МПа}$, $K = 2,5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$.

Для расчета демпфирующих свойств ТРМЭ учтены вязкоупругие свойства резины только при сдвиге. Поскольку длины сейсмических волн составляют десятки километров, что много больше линейных размеров ТРМЭ, то при сейсмической нагрузке фундамент здания движется как одно целое, (плоскость фундамента остается параллельной самой себе), что позволило свести всё разнообразие сейсмических нагрузок к простому сдвигу (рис.6).

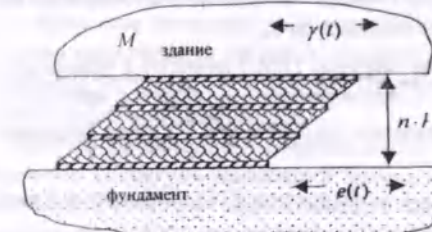


Рис.6 Схема нагружения ТРМЭ, простой сдвиг: где $e(t)$ - временная зависимость сдвига фундамента, $\gamma(t)$ - смещение корпуса здания под воздействием сейсмической нагрузки.

Деформация сдвига слоев резины в ТРМЭ составит $\epsilon(t) = \frac{\gamma(t) - e(t)}{n \cdot h}$, где n - количество резиновых слоев, h - толщина одного резинового слоя.

Для расчета демпфирующих свойств ТРМЭ, в первом приближении можно пренебречь линейными размерами здания и заменить его точечной массой M , т.е. представить в виде модели с одной степенью свободы (рис.6).

Предполагая, что задано смещение земной поверхности во времени $e(t)$ и надо найти смещение $\gamma(t)$ массы M с учетом вязкоупругих свойств ТРМЭ, согласно второму закону Ньютона определяется

$$M\ddot{\gamma}(t) + \omega_0^2 \cdot \left[(\gamma(t) - e(t)) - \int_0^t R(t-\tau) \cdot (\gamma(\tau) - e(\tau)) d\tau \right] = 0, \quad (24)$$

где $\omega_0 = \sqrt{SG_0/n \cdot h \cdot M}$ - характерная частота колебаний системы, $R(t-\tau)$ - определяется вязко-упругими свойствами резины.

Зависимость коэффициента передачи $\gamma_0/\epsilon_0 = f(\omega)$ (ϵ_0 - амплитуда сейсмических колебаний, γ_0 - амплитуда устоявшихся колебаний массы) от частоты ω вынуждающей силы является универсальным соотношением, характеризующим демпфирующие свойства ТРМЭ для любого возмущения $\epsilon_0(t)$. На рис.7 приведена зависимость коэффициента передачи как функции вынуждающей частоты при нескольких значениях параметров ω_0 при $\beta=0,5$.

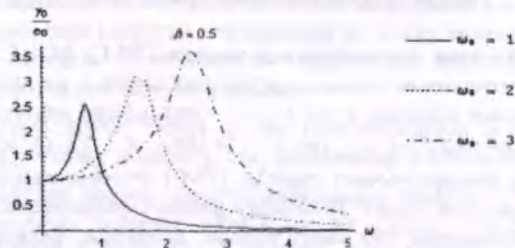


Рис.7 Зависимость коэффициента передачи от частоты вынуждающих колебаний

При гармонической нагрузке ТРМЭ ослабляет сейсмическое воздействие на корпус здания, только если частота вынуждающих колебаний $\epsilon_0(t) = \epsilon_0 \sin(\omega t)$ заметно больше, чем ω_0 .

В противном случае наличие ТРМЭ приведет к усилению сейсмического воздействия на здание. Следовательно, ω_0 является критерием, который позволяет выбрать оптимальные параметры ТРМЭ для заданного спектра частот возбуждения $\epsilon(\omega)$.

В пределе $(\omega/\omega_0)^2 \rightarrow \infty$ выражение (20) переходит в известную формулу для потерь при гармоническом нагружении эластомера, когда одна из лицевых поверхностей неподвижна. Итак, в пределе $\omega \rightarrow \infty$ сейсмозащита с помощью ТРМЭ достаточно эффективна. Это соответствует теории виброзащиты: если собственная частота колебаний здания в три раза меньше частоты вынуждающих колебаний, то амплитуда ослабляется примерно в 10 раз.

Далее в §4.4 для использования в качестве сейсмоизоляции зданий выбраны исходные параметры резинометаллических опор: марка резины, вертикальная и горизонтальная жесткости, геометрические размеры.

Обычно сейсмоопоры ТРМЭ устанавливаются между фундаментом здания и нижним этажом, и при землетрясениях это позволяет ослабить сейсмические воздействия на корпус здания приблизительно на 1-2 балла (рис.8).

Системы сейсмозащиты из ТРМЭ рекомендуется применять при проектировании и строительстве сооружений с жесткой конструктивной схемой:

- высотой до 12-ти этажей включительно с несущими стенами и диафрагмами из крупнопанельных, объемно-блочных конструкций и со стенами

из монолитного железобетона;

- высотой до 5-ти этажей с несущими стенами из комплексных конструкций, из индустриальных виброкирпичных блоков и панелей;
- высотой до 12 этажей включительно зданий с железобетонным каркасом, имеющих диафрагмы и ядра жесткости.

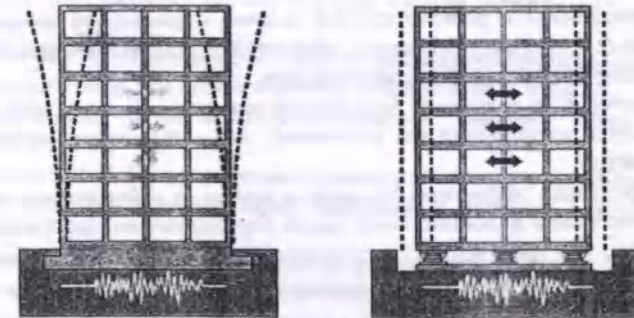


Рис.8 Поведение здания без и с ТРМЭ при сейсмическом колебании

В конце, в §4.6 приведен пример расчета здания на воздействие реального землетрясения с относительным смещением частиц на земной поверхности (магнитудой) 6,5. Временная зависимость ускорений грунта и корпуса здания в одном направлении представлена на рис.9. Параметры сейсмозащиты соответствуют собственной частоте $\omega_0 = 3$ и $\beta = 0,5$. Приведенная $\ddot{\gamma}(t)$ найдена при помощи численного преобразования Фурье.

Движение грунта в значительной степени хаотично, поэтому за конечный интервал времени амплитуда колебаний здания не успевает сильно вырасти (рис.9), что сильно повышает эффективность сейсмозащиты.

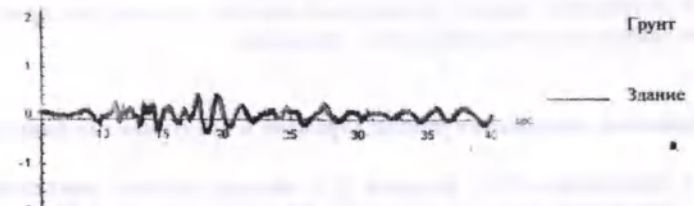


Рис.9 Зависимость горизонтальных ускорений грунта $\ddot{a}(t)$ и корпуса здания $\ddot{\gamma}(t)$ от времени. Относительные единицы

Для получения развертки напряженного состояния ТРМЭ по времени предложен способ поэтапной дискретизации. Учитывая, что ТРМЭ являются элементами, соединяющими здание с основанием, и силы, действующие на

них во время сейсмического воздействия, определяются колебаниями грунта и колебаниями здания, нагрузка задается последовательно с достаточно малым шагом дискретизации на нижнюю и верхнюю грани ТРМЭ. Для каждого этапа определяются напряжения и перемещения. Разработан алгоритм определения напряженно-деформированного состояния ТРМЭ.

В заключении приводятся основные результаты и выводы, полученные в работе:

1. Определены и решены краевые задачи, отражающие жесткость деформируемых резинометаллических элементов с использованием гипотез о распределении напряжений в резиновом слое.

2. Полученные расчетные зависимости определения жесткости позволяют определять напряжения как массивных, так и тонких резинометаллических элементов.

3. Определена эффективность защиты здания от сейсмических воздействий с применением дополнительной малой горизонтальной жесткости ТРМЭ при условии, что собственная частота колебаний $\omega_b \geq 2$. Это условие может быть выполнено за счет выбора резины с меньшим мгновенным модулем сдвига.

4. Предложены зависимости определения напряженного состояния и жесткости ТРМЭ при воздействии сейсмической нагрузки. Для этого разработаны алгоритм расчета ТРМЭ при сейсмических воздействиях и математическая модель ТРМЭ, которая позволяет рассчитать жесткостные свойства тонкого плоского упругого слоя, жестко сцепленного с двумя недеформируемыми лицевыми поверхностями.

5. Спроектирован и произведен промышленный образец ТРМЭ.

6. Определены демпфирующие и диссипативные свойства резинометаллических опор и указаны параметры эффективной их работоспособности. Замечены, что характерные длины сейсмических волн, составляющие десятки километров, что намного больше размеров ТРМЭ, то при сейсмической нагрузке двигают фундамент здания как одно целое.

7. Результаты работы коммерциализируемы и возможно производство тонкослойных резинометаллических элементов.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях

1. Ормонбеков Т.О., Бегалиев У.Т. Методы расчета тонкослойных резинометаллических элементов. Сб. научных трудов "КыргызНИИП-строительства" (1998-1999), Бишкек: Илим, 1999 – с.28-34.
2. Ормонбеков Т.О., Бегалиев У.Т. Parameters Optimum Choice of Rubber-metal Bearings for Seismic Isolation Taking into account Regional Conditions (the Case of Kyrgyz Republic). Proceedings of 7th International Seminar "Seismic isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures", Assisi, Italy, 2-5.10.2001., p.173-175.

3. Ормонбеков Т.О., Бегалиев У.Т. Design of Buildings for Applying of Seismoisolation Bearings. Proceedings of 8th World Seminar "Seismic isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures", Yerevan, 2003, p.571-587.
4. Ормонбеков Т.О., Бегалиев У.Т. Упрощенный вариационный подход в расчетах резиновых элементов конструкций в области малых деформаций. Сб. научных трудов "Научная сессия МИФИ-2004", Т.5. М.: 2004. – С.117-118.
5. Уранова С.К., Бегалиев У.Т. Применение многослойных резинометаллических опор для сейсмоизоляции сооружений в Армении. Сб. научных трудов "КыргызНИИП-строительства", Бишкек: Илим, 1998 – с.23-28.
6. Бегалиев У.Т. Расчет резинометаллической опоры на статическое воздействие. Строительная наука: проблемы и решения. Бишкек: Илим, 2000 – с.4-8.
7. Бегалиев У.Т. Расчет тонкослойных резинометаллических элементов в случаях малой и большой деформаций. Материалы Международной научно-практической конференции "Современное состояние и перспективы развития строительной науки", Часть 1/КГУСТА. Бишкек, 2000 – с.136-140.
8. Бегалиев У.Т. О соответствии норм по сейсмостойкому строительству УВС1997 и СНиП II-7-81*. Сб. трудов республиканской научно-практической конференции "Проблемы строительной отрасли и пути их решения" (4-6.07.2001г.). Бишкек, Технология, 2001 – с.11-15.
9. Бегалиев У.Т. Сейсмоизоляция зданий в особых условиях. Материалы научно-практического семинара "Особенности прогнозирования и строительства горных поселков в Кыргызской Республике с учетом региональных природно-климатических условий" (19.04.2002г.), Бишкек, Илим, 2002 – с.101-103.

АННОТАЦИЯ

Расчет тонкослойных резинометаллических элементов конструкций

В данной диссертационной работе решаются задачи расчета резинометаллических элементов на сжатие, изгиб и сдвиг с учетом объемной сжимаемости и несжимаемости резинового слоя. Предложенный подход заключается в том, что упрощаются пространственные задачи определения жесткости за счет использования систем гипотез о распределении напряжений в резиновых элементах. Впервые создается модель тонкослойного резинометаллического элемента.

АННОТАЦИЯ

Конструкциялардын кичи калыңдыктагы резинометал элементтерин эсептөө.

Бул диссертациялык иште резинометал элементтерин кысуу, ийилүү жана жылышуу маселелерин, резина катмарынын көлөмүнүн өзгөрүү жана өзгөрбөө учурун эске алуу менен эсептелет. Берилген ыкманын негизи - көлөмдүү маселелерди резина элементтеринин ичиндеги чыналуунун таралышы жөнүндөгү гипотеза системаларын колдонуу менен катуулукту аныктоо. Кичи калыңдыктагы резинометал элементтеринин модели биринчилерден болуп түзүлгөн.

ANNOTATION

Calculation of thin layered rubber-metal elements of structures.

In the given dissertations work solves problems of calculation rubber-metal elements on compression, a bend and shift in view of volumetric compressibility and non-compressibility of rubber layer. The offered approach consists that spatial problems become simpler due to use of systems of hypotheses about distribution of pressure in rubber elements. For the first time the model of thin layered rubber-metal element is created.

Бегалиев Улугбек Турдалиевич

РАСЧЕТ ТОНКОСЛОЙНЫХ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Автореферат диссертации

Тех. ред. Курманалиев Б.К.

Подписано к печати 22.02.2005. Формат бумаги 60x84¹/₁₆.
Бумага офс. Печать офс. Объем 1,00 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 78.

720044, Бишкек, ул. Сухомянинова, 20.

ИЦ "Техник" КТУ, т.: 42-14-55, 54-29-43

E-mail: ict@ktu.aknet.kg, beknur@mail.ru