

На правах рукописи

Котов Антон Сергеевич

**Разработка методик расчета
упругодемпфирующих характеристик
виброизоляторов из материала МР**

Специальность 01.02.06
"Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры"

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2007

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева» на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

Научный руководитель:

д-р техн. наук, проф. Пономарев Юрий Константинович

Официальные оппоненты:

д-р техн. наук, проф. Еленевский Дмитрий Сергеевич, директор федерального государственного унитарного предприятия «Самарский научно-инженерный центр автоматизированных прочностных испытаний и диагностики машин» (СНИЦ АПИДМ)

канд. техн. наук, доц. Мальтеев Марат Абдулкадырович, доцент кафедры основ конструирования машин ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева».

Ведущая организация:

ФГУП ГНПРКЦ "ЦСКБ-Прогресс", г. Самара

Защита состоится «12» октября 2007 г. в 13.00 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.215.02 в Самарском государственном аэрокосмическом университете имени академика С.П. Королева по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева.

Автореферат разослан «11» сентября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



В.Н. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная техника в настоящее время эксплуатируется в условиях интенсивной вибрации, агрессивных и криогенных сред, высоких и низких температур, радиации, вакуума. Это накладывает определенные ограничения на проектирование средств виброударозащиты, которые должны быть стойкими к вышеуказанным факторам. Поэтому применение традиционных упругодемпфирующих материалов (эластомеров, вспененных пластических масс, полимеров) для изготовления упругодемпфирующих элементов защитных устройств становится малоэффективным, а в ряде случаев просто невозможным.

В 60-х годах прошлого века в КуАИ (ныне СГАУ) под руководством профессора А.М. Сойфера был создан уникальный цельнометаллический упругопористый материал, напоминающий по своей структуре резину и обладающий, в отличие от нее, рядом важных свойств. Этот материал получают путем холодного прессования предварительно сформированной заготовки из проволочного материала. Он получил название металлорезина (МР). С применением материала МР стало возможным применение виброизоляторов в жестких условиях.

Однако, несмотря на широкое применение указанного материала в виброзащитной технике, до сих пор создание конкретных конструкций виброизоляторов осуществлялось экспериментальным путем: не существовало научнообоснованных точных методик их расчета на основные виды деформирования.

Поэтому работа, направленная на изучение механических свойств материала МР и использование этих характеристик при составлении математических моделей сложных элементов при различных видах нагружения, является весьма актуальной.

Целью работы является создание методик расчета упругодемпфирующих характеристик виброизоляторов и демпферов в виде односторонних и двусторонних упругогистерезисных упоров на основе обобщенной математической модели материала МР.

Задачи исследования:

- установить закономерности прессования материала МР;
- выявить функциональные связи нагрузочных характеристик материала МР с его конструктивно-технологическими параметрами;
- разработать методики расчета жестких и демпфирующих свойств виброизоляторов для пространственных виброзащитных систем при их произвольном нагружении;
- разработать комплекс алгоритмов и программ автоматизированного расчета упругодемпфирующих характеристик ряда конструкций демпферов и виброизоляторов общего машиностроения на базе материала МР для оптимизации их технических характеристик.

Методы исследования. При создании математических моделей деформирования изделий из материала МР использованы традиционные методы теоретической механики, механики деформируемого твердого тела с нелинейными упругими характеристиками совместно с использованием математических пакетов Mathcad, Matlab, Simulink. При проектировании средств виброзащиты для предприятий машиностроения, авиационной и ракетно-космической техники, а также газовой и нефтяной промышленности использовались современные принципы проектирования, основанные на 3D-моделировании. При экспериментальном исследовании свойств материала МР широко использовались методы теории подобия и размерностей в сочетании с методами математической статистики, реализованными с помощью пакетов Origin и TableCurve.

Научная новизна. Разработаны математические модели, основанные на аналитических выражениях, описывающих упругодемпфирующие характеристики материала МР в критериальном виде при однородном напряженно-деформированном состоянии, позволившие определить нагрузочные характеристики виброизоляторов ряда конструктивных схем при различных видах нагружения.

Автор защищает:

- закон, связывающий параметры прессования заготовки из материала МР с геометрическими параметрами и характеристиками готовых упругодемпфирующих элементов;
- математическую модель процесса деформирования материала МР при однородном напряженно-деформированном состоянии сжатия в новых критериальных координатах;
- закономерности описания упругогистерезисных петель демпферов и виброизоляторов из материала МР при замкнутых траекториях движения вибратора;
- закономерности влияния неравномерности распределения материала МР по объему упругодемпфирующего элемента на форму упругогистерезисных петель;
- комплекс методик, алгоритмов и программ расчета характеристик изделий из материала МР в виде односторонних и двусторонних упругогистерезисных упоров;
- математическую модель стабилизации и смещения центров полей упругогистерезисных петель при многоцикловом нагружении.

Практическая ценность работы. Предложенный метод представления нагрузочных характеристик из материала МР в предложенных критериальных координатах, совместно с найденной в работе единственной формой представления гистерезиса на сжатие, позволяет создавать методики расчета упругодемпфирующих характеристик реальных виброизоляторов и демпферов при различных видах деформирования, что существенно сокращает сроки разработки виброзащитных систем.

На базе созданных алгоритмов и программ отработан ряд конструктивных схем и технологий серийного производства высокоэффективных виброизоляторов для общего машиностроения, внедренных на отечественных предприятиях с большим экономическим эффектом.

Научное обоснование эллипсности форм упругогистерезисных петель при деформировании кольцевых демпферов и виброизоляторов из материала МР по замкнутым круговым траекториям позволяет распространить отработанные методики динамических расчетов механических систем с вязким трением на системы с конструкционным демпфированием.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при проектировании виброизоляторов ВВК.01 и ВВК.02, которые внедрены на ЗАО «Управляющая компания «Брянский машиностроительный завод» и ОАО «Новокуйбышевский нефтеперерабатывающий завод», что позволило существенно улучшить вибрационное состояние объектов виброзащиты со значительным экономическим эффектом.

Кроме того, созданные автором алгоритмы и программы расчета используются в учебном процессе СГАУ при курсовом и дипломном проектировании на кафедре «Конструкция и проектирование двигателей летательных аппаратов», а также в дисциплине «Динамика и прочность машин».

Апробация работы. Основное содержание диссертационной работы докладывалось:

- на Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения», 1-3 июня 2007 г., Самара;
- на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», 21-23 июня 2006 г., Самара;
- на Международном конгрессе по машиностроительным технологиям, Варна, Болгария, 2004;
- на XXIV Российской школе по проблемам науки и технологий, Миасс, 2004;
- на Международной интернет-конференции «Проблемы строительного и дорожного комплексов», БГИТА, Брянск, 2006;
- на Туполевских чтениях, КГТУ-КАИ, Казань, 2004;
- на научно-технической конференции «Неоднородные конструкции», г. Челябинск, УО РАН, 2004.

Публикации. По материалам исследований опубликовано 19 работ, из них 10 научных статей, 2 тезиса докладов, получено 7 патентов РФ на изобретения и полезные модели, основные из которых представлены в данном автореферате.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 201 страницах машинописного текста, содержит 148 рисунков и 4 таблицы. Список использованных источников

составляет 162 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, дается краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния вопроса виброзащиты и постановке задач исследования виброзащитных систем на основе материала МР.

В настоящее время известно большое количество конструктивных схем виброзащитных устройств как зарубежного, так и отечественного производства (рис. 1). Авторство представленных конструкций принадлежит представителям Самарской школы конструкционного демпфирования: А.М. Сойферу, А.И. Белоусову, Д.Е. Чегодаеву, В.П. Иванову, В.Н. Бузицкому, Ю.И. Байбородову, Ю.К. Пономареву, Г.В. Лазуткину, А.А. Тройникову, В.А. Першину, А.Д. Пичугину, Л.Г. Шайморданову, В.А. Колесникову, А.М. Уланову, Е.А. Панину, М.А. Мальтееву, В.А. Фролову и др. Следует отметить также разработки авторов немецкой фирмы «Stop-Choc» Schmolli Eduard, Kozian Rudolf, Ottmar Horst, Bernd Worms, Hoffmann Martin, Koehl Hans, Schaffer Lothar и др.

В настоящей главе рассмотрены две альтернативные технологии производства упругодемпфирующих элементов из опрессованного проволочного материала - отечественная и зарубежная. Первая основана на способе холодного прессования хаотически уложенной, предварительно растянутой спирали. Вторая - на получении тканой заготовки в виде чулка из металлической проволоки, сворачивании чулка в рулон и последующего холодного прессования. Каждая из технологий имеет как положительные, так и отрицательные стороны, проанализированные в работе.

Дальнейшие исследования автора направлены на изучение свойств и совершенствование методик расчета отечественного материала МР.

По известной классификации Д.Е. Чегодаева и Ю.К. Пономарева материал МР является типичным представителем систем конструкционного демпфирования. Исследованиями этих систем в разные годы занимались большое количество ученых: Я.Г. Пановко, Г.И. Страхов, А.М. Сойфер, И.Д. Эскин, В.П. Филекин, Н.Г. Калинин, Ю.А. Лебедев, В.И. Лебедева, Н.Ф. Карпачев, Г.П. Жданов, С.М. Дорошко, М.В. Хвингия и др. Исследования этих ученых позволили выявить ряд основополагающих свойств систем конструкционного демпфирования, среди которых наиболее важными являются: гистерезисный характер их циклического нагружения, независимость величины циклической рассеянной энергии от скорости нагружения и существование экстремума по коэффициенту поглощения. Не менее важным стало установление того факта, что по уровню диссипации энергии

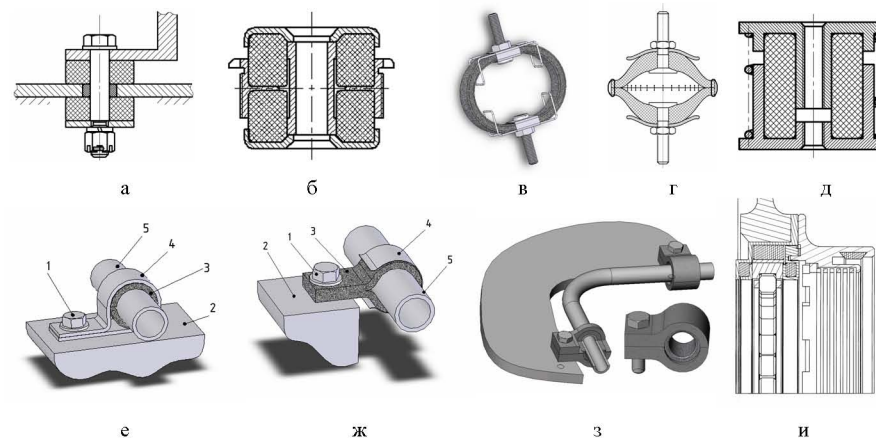


Рис. 1. Отечественные разработки виброзащитных систем: а - бескорпусной втулочный виброизолятор; б - втулочный виброизолятор типа ВВ; в - кольцевой виброизолятор; г - «колокольчиковый» виброизолятор; д - виброизолятор втулочный с разгрузочной пружиной; е, ж, з - демпферы опор трубопроводов, и - демпфер подшипникового узла ГТД

конструкционное демпфирование в десятки раз превосходит внутреннее трение в материалах.

Известно несколько физических и математических моделей материала МР и конкретных виброизоляторов из этого материала. Они основаны либо на статистических методах при случайном распределении контактирующих упругодеформируемых пар (А.М. Сойфер, Л.Г. Шайморданов), либо на аппроксимации математическими выражениями экспериментально полученных нагрузочных характеристик конкретных типоразмеров виброизоляторов (Г.В. Лазуткин, В.Н. Бузицкий, А.М. Уланов), либо на абстрактной замене реальных виброизоляторов каким-либо аналогом конструкционного демпфирования, с эквивалентными упругодемпфирующими свойствами (А.И. Белоусов, А.А. Тройников, С.Д. Барас). Исследования перечисленных авторов раскрыли некоторые качественные закономерности процессов, протекающих в материале при его производстве и эксплуатации, указали границы применимости материала, показали, наряду с большими потенциальными возможностями, большие трудности в создании методик расчета. Предложенные вышеуказанными авторами подходы, к сожалению, не дали возможности создать универсальные инженерные методики расчета жесткостных и демпфирующих характеристик более или менее сложных конструкций виброизоляторов из материала МР, таких как АЦВ, ВВ, АК, ДКУ и других, показанных на рис. 1.

Автором избран в качестве направления научных исследований подход, базирующийся на выявлении обобщенной нагрузочной характеристики элемента из материала МР, полученной экспериментально при однородно

напряженном состоянии сжатия с последующим использованием указанной обобщенной характеристики в расчетах при реальном напряженном состоянии упругого элемента виброизолятора.

Вторая глава посвящена методологии исследования нагрузочных характеристик материала МР при однородном напряженном состоянии сжатия, поиску оптимальных критериальных координат их представления, разработке математических моделей конкретных виброизоляторов при различных условиях их нагружения с использованием найденных безразмерных нагрузочных характеристик материала.

Для создания методик расчета конкретных изделий из материала МР необходимо определить экспериментально нагрузочную характеристику образца материала в координатах напряжения – деформация ($\sigma - \varepsilon$), полученную в условиях однородного напряженного состояния, например при пульсирующем цикле сжатия цилиндрической втулки (рис. 2).

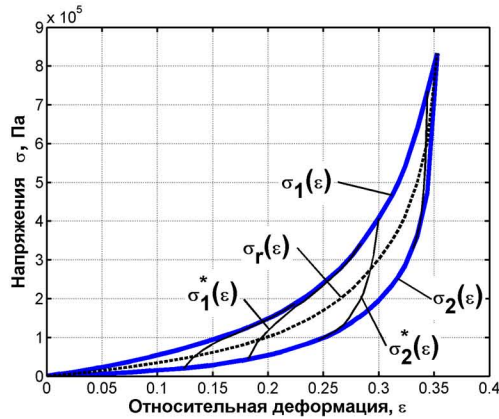


Рис. 2. Поле петель гистерезиса при циклическом деформировании втулки на сжатие

В результате такого нагружения образца из материала МР получается петля гистерезиса. Если нагружение или разгрузке осуществляется из произвольных точек ε_0 , внутренние процессы загрузки представляют собой процессы σ_1^* и σ_2^* , асимптотически приближающиеся к граничным процессам петли гистерезиса σ_1 и σ_2 . В соответствии с традиционным представлением, гистерезис можно представить в виде суммы упругих напряжений в материале МР, которые отображаются среднениклическим процессом $\sigma_r(\varepsilon)$

$$\sigma_r(\varepsilon) = \frac{\sigma_1(\varepsilon) + \sigma_2(\varepsilon)}{2}, \quad (1)$$

и неупругих напряжений, определяемых в виде

$$\sigma_t(\varepsilon) = \frac{\sigma_1(\varepsilon) - \sigma_2(\varepsilon)}{2}. \quad (2)$$

В точке смены направления деформирования от нагружения к разгрузке происходит структурная перестройка сил трения в контактирующих

парах материала МР, простирающаяся в диапазоне, который можно условно назвать «интегральной зоной предварительных смещений».

В работе предлагается при анализе формы гистерезиса на первом этапе анализа исключить указанную зону из рассмотрения и построить разгрузочный процесс во всем диапазоне деформирования без учета эффекта «предварительных смещений» $\sigma_t^*(\varepsilon)$, который легко аппроксимировать полиномом.

Тогда процессы $\sigma_r^*(\varepsilon)$ и $\sigma_2^*(\varepsilon)$ показанные на рис. 3 и 4, можно представить в виде

$$\sigma_r^*(\varepsilon) = \sigma_1(\varepsilon) - \frac{\sigma_t^*(\varepsilon)}{2}; \quad \sigma_2^*(\varepsilon) = \sigma_r(\varepsilon) - \frac{\sigma_t^*(\varepsilon)}{2}. \quad (3)$$

Получив внешние контуры петли гистерезиса, определяемые зависимостями $\sigma_1(\varepsilon)$ и $\sigma_2^*(\varepsilon)$, толщина петли в направлении деформации ε – «остаточная деформация», используемая в дальнейшем для обобщения свойств гистерезиса, определяется выражением (рис. 4)

$$a_0(\varepsilon_0) = \varepsilon_2 [\sigma_r^*(\varepsilon_0)] - \varepsilon_1 [\sigma_r^*(\varepsilon_0)], \quad (4)$$

где $\varepsilon_1[\sigma_r^*(\varepsilon_0)]$ и $\varepsilon_2[\sigma_r^*(\varepsilon_0)]$ - значения деформаций, определенных на процессах $\sigma_1(\varepsilon)$ и $\sigma_2^*(\varepsilon)$ при значении $\sigma_r(\varepsilon_0)$.

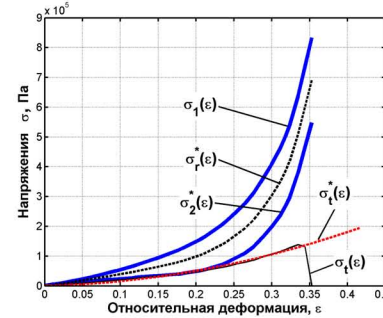


Рис. 3. Восстановление упругой составляющей образца при циклическом деформировании на сжатие

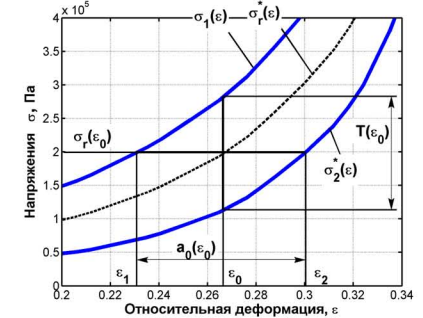


Рис. 4. Определение толщины петли в направлении деформации ε – «остаточной деформации»

Для описания внутренних процессов в работе введены новые безразмерные переменные λ и ξ , определяемые в виде

$$\lambda = \frac{\sigma_1(\varepsilon) - \sigma_1^*(\varepsilon)}{T(\varepsilon_0)} = \frac{\sigma_2^*(\varepsilon) - \sigma_2(\varepsilon)}{T(\varepsilon_0)}; \quad (5)$$

$$\xi(\varepsilon, \varepsilon_0) = \frac{|\varepsilon_0 - \varepsilon|}{a_0(\varepsilon_0)}, \quad (6)$$

благодаря чему процесс произвольного нагружения материала МР удалось описать выражением

$$\sigma_{\varphi}^*(\varepsilon, \varepsilon_0, \nu) = \sigma_r^*(\varepsilon) + \frac{1}{2} \cdot (-1)^{\nu+1} \cdot \sigma_t^*(\varepsilon) + (-1)^{\nu} \cdot \sigma_t^*(\varepsilon_0) \cdot e^{\frac{-k \cdot |\varepsilon_0 - \varepsilon|}{a_0(\varepsilon_0)}}, \quad (7)$$

где ε - текущая относительная деформация, ε_0 - координата начала деформирования, $\sigma_r(\varepsilon)$ - средние напряжения цикла, $\sigma_t(\varepsilon)$ - обобщенные напряжения от сил трения, $a_0(\varepsilon_0)$ - «остаточная деформация» в точке начала процесса ε_0 , ν - параметр направления процесса: $\nu = 1$ - для процесса нагрузки, $\nu = 2$ - для процесса разгрузки.

Для обобщения информации о свойствах материала МР введем новые критериальные координаты: относительные напряжения и изменение относительной плотности:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{P_{np}}; \quad \delta_{\rho} = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = \frac{\bar{\rho}}{\rho_0} - 1, \quad (8)$$

где σ - текущее изменение напряжений, P_{np} - давление прессования, $\bar{\rho}$ - текущая относительная плотность, ρ_0 - начальная относительная плотность образца.

После приведения поля петель гистерезиса к безразмерному виду в координатах (8) удалось свести множество полей петель к единой нагрузочной характеристике:

$$\bar{\sigma}_{\varphi}^*(\delta_{\rho}, \delta_{\rho_0}, \nu) = \bar{\sigma}_r(\delta_{\rho}) + \frac{1}{2} \cdot (-1)^{\nu+1} \cdot \bar{\sigma}_t(\delta_{\rho}) + (-1)^{\nu} \cdot \bar{\sigma}_t(\delta_{\rho_0}) \cdot e^{\frac{-k \cdot |\delta_{\rho_0} - \delta_{\rho}|}{a_0(\delta_{\rho_0})}}, \quad (9)$$

где δ_{ρ} - текущее относительное изменение плотности, δ_{ρ_0} - координата начала произвольного процесса нагружения, $\bar{\sigma}_r(\delta_{\rho}) = \sigma_r^*(\delta_{\rho})/P_{np}$ - относительные средние напряжения цикла, $\bar{\sigma}_t(\delta_{\rho}) = \sigma_t^*(\delta_{\rho})/P_{np}$ - относительные обобщенные напряжения от сил трения, P_{np} - давление прессования, $a_0(\delta_{\rho_0})$ - «остаточная деформация» в точке начала процесса δ_{ρ_0} , ν - параметр направления процесса.

Применим разработанную модель материала в виде (9) для расчета упругодемпсирующих характеристик различных конструкций демпферов, представленных на рис. 5. Создание методик расчета упругодемпсирующих характеристик указанных конструкций выполнено на базе традиционного подхода в механике твердого деформируемого тела с учетом гистерезисного характера поведения материала МР и при использовании

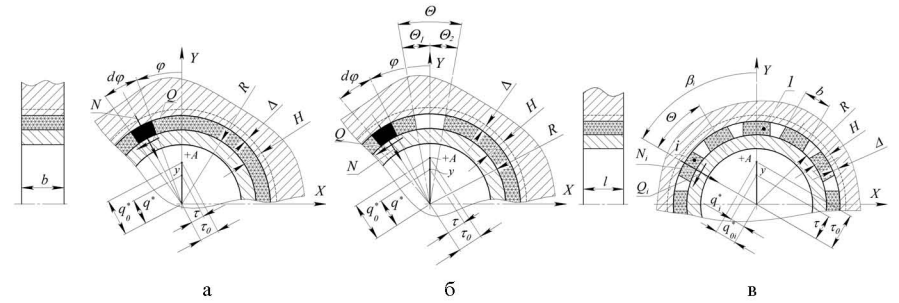


Рис. 5. Расчетные схемы демпферов при одноосном нагружении

следующих допущений:

- характеристика материала МР описывается выражением (9);
- сдвиговыми деформациями материала пренебрегаем;
- вибратор демпфера во всех представленных на рис. 5 схемах имеет возможность проскальзывания с трением, реализующим эффект предварительных смещений, при котором коэффициент трения f зависит от взаимного проскальзывания Δ_f в представлении Д.Е. Чегодаева и Ю.К. Пономарева:

$$f(\Delta_f) = f \cdot (-1)^{\nu} \cdot (1 - 2e^{-k \cdot \Delta_f}). \quad (10)$$

Выделив бесконечно малый элемент известной ширины и угловой протяженности $d\varphi$, задавшись направлением и величиной смещения вибратора, определяя из геометрических соображений его текущую относительную плотность и ее амплитудное значение, определяем суммарную силу сопротивления демпфера, имеющую гистерезисный характер.

Для одноосного нагружения демпферов (см. рис. 5, а, б) указанные силы сопротивления соответственно находятся в виде

$$F_{\Sigma} = \int_0^{2\pi} \bar{\sigma}_{\varphi}^*(\delta_{\rho}, \delta_{\rho_0}, \nu) \cdot P_{np} \cdot R \cdot b \cdot (\cos \varphi + f(\Delta_f) \cdot \sin \varphi) d\varphi; \quad (11)$$

$$F_{\Sigma} = \int_{\theta_1}^{2\pi - \theta_2} \bar{\sigma}_{\varphi}^*(\delta_{\rho}, \delta_{\rho_0}, \nu) \cdot P_{np} \cdot R \cdot b \cdot (\cos \varphi + f(\Delta_f) \cdot \sin \varphi) d\varphi, \quad (12)$$

а для схемы, показанной на рис. 5, в:

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \bar{\sigma}_{\varphi}^*(\delta_{\rho_{0i}}, \delta_{\rho_{0i}}, \nu) \cdot P_{np} \cdot R \cdot b \cdot (\cos \beta_i + f(\Delta_f) \cdot \sin \beta_i) \quad (13)$$

Представленная методика позволяет рассчитывать не только суммарную силу сопротивления, но и ее составляющие: усилие сопротивления в материале МР и усилие за счет граничного трения материала о корпусные детали. Вид расчетных петель гистерезиса для схем, изображенных на рис. 5, а, в, показан на рис. 6, а. Для расчетной схемы, представленной на рис. 5, б, гистерезис и его составляющие имеют вид, показанный на рис. 6, б.

Кроме рассмотренного в работе исследован случай, когда вибратор

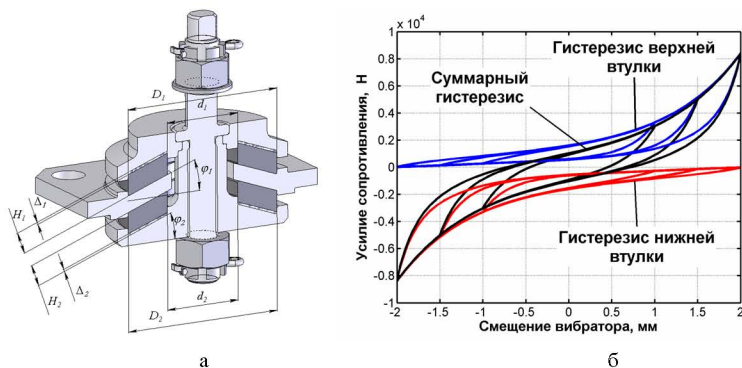


Рис. 10. Расчетная схема при нагружении цилиндрической конусной втулки в осевом и радиальном направлениях

Далее в работе рассмотрен вопрос об осевом и радиальном деформировании виброизолятора, выполненного в виде двустороннего упругогистерезисного упора, состоящего из двух конусных втулок из материала МР, собранных с предварительным натягом (рис. 10).

Математически задача о деформировании указанного виброизолятора свелась к выделению бесконечно малого элемента материала каждой из втулок, составлению для них условий равновесия, нахождению распределения давлений на вибратор и корпусные детали с учетом внутреннего гистерезиса в материале и распределенных сил трения в контакте элемента из материала МР и корпусных деталей и интегрирования всех распределенных сил по объему деформируемых элементов.

Результаты представлены в виде критериев подобия, полностью определяющих процессы деформирования виброизолятора.

В ходе расчетного исследования рассмотренных характеристик демпферов и виброизоляторов изучен процесс многократного нагружения объектов из материала МР с произвольной матрицей амплитуд деформирования, позволивший найти закономерности смещения центров петель в зависимости от диапазонов нагружения, а также установить минимальное число циклов нагружения, при которых петли гистерезиса замыкаются. Это, в свою очередь, повысило точность расчетов упругодемпфирующих характеристик виброзащитных систем.

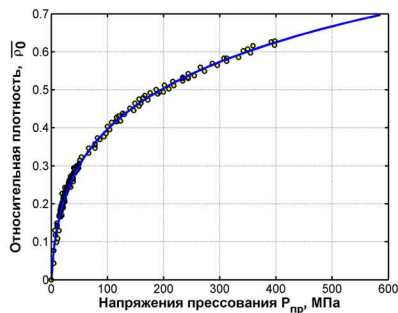


Рис. 11. Зависимость относительной плотности изделий из материала МР в свободном состоянии от напряжений прессования

Третья глава посвящена описанию

экспериментального определения характеристик материала МР.

В ходе исследования установлен основополагающий технологический закон формирования изделий из этого материала, состоящий в том, что существует единая связь между напряжениями прессования изделия в пресс-форме и получаемой в ходе прессования относительной средней по объему плотности изделия в свободном состоянии (рис. 11):

$$\bar{\rho}_0(P_{np}) = (0.117 \ln P_{np} + 0.092)^2; \quad P_{np}(\bar{\rho}_0) = e^{-0.788+8.57 \cdot \bar{\rho}_0^{0.5}} \quad (16)$$

С использованием выражения (16) в ходе экспериментального исследования выявлены единые математические выражения входящие в виде компонентов $\bar{\sigma}_r(\delta_\rho)$, $\bar{\sigma}_t(\delta_\rho)$, $\bar{a}_0(\delta_\rho)$ в зависимости (9), позволившие обобщить механические свойства материала МР и изделий из него в критериальном виде.

Четвертая глава диссертации посвящена теоретическому исследованию особенностей гистерезиса при одноосном и прецессионном нагружении реальных конструкций демпферов и виброизоляторов из материала МР, сравнению полученных результатов с экспериментом и проектированию на основе выявленных закономерностей сложных систем виброзащиты для объектов общего машиностроения и нефтегазоперерабатывающей промышленности.

Спроектирован, изготовлен и испытан виброизолятор для системы виброзащиты дизель-генератора 21-26ДГ, устанавливаемый на новый магистральный отечественный тепловоз 2ТЭ25К «Пересвет» производства ЗАО «Управляющая компания «Брянский машиностроительный завод». На способ установки дизель-генератора получен патент Российской Федерации.

С использованием современных подходов трехмерного проектирования, метода конечных элементов и созданных в работе методик расчета упругодемпфирующих характеристик для нефтяной компании «ЮКОС» ОАО «Новокуйбышевский нефтеперерабатывающий завод» спроектирована, изготовлена и испытана система снижения уровня вибрации на базе более 80 демпферов из материала МР. Проведенные при непосредственном участии диссертанта мероприятия позволили снизить уровень вибрации до 10 раз и обеспечить дальнейшую безопасную эксплуатацию установки «Изомеризация легких бензиновых фракций» при работающих компрессорах ПК-1 и ПК-2.

Сходимость результатов расчета при одноосном и прецессионном нагружении демпферов с экспериментом в целом составила не более 5% по максимальному значению коэффициента поглощения, не более 10% по среднециклической жесткости и, кроме собственных испытаний, доказана на экспериментальной установке китайскими исследователями в Харбинском политехническом институте.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Созданы методики расчета упругодемпфирующих характеристик виброизоляторов и демпферов в виде односторонних и двусторонних упругогистерезисных упоров на основе созданной обобщенной математической модели материала МР, позволяющие проводить проектирование виброизоляторов для пространственных систем виброзащиты.

2. Разработан комплекс алгоритмов и программ автоматизированного расчета упругодемпфирующих характеристик ряда конструкций демпферов и виброизоляторов общего машиностроения на базе материала МР в виде односторонних и двусторонних упругогистерезисных упоров при одноосных и круговых движениях вибратора, позволившие оптимизировать их технические характеристики.

3. В результате широкого экспериментального исследования механических свойств материала МР установлен закон, связывающий параметры прессования заготовки в пресс-форме с геометрическими параметрами и характеристиками готовых упругодемпфирующих элементов.

4. На базе теории подобия и размерностей и обобщения широких экспериментальных данных по исследованию деформирования образцов из материала МР создана новая математическая модель гистерезиса материала в критериальных координатах: безразмерные напряжения деформирования – изменение относительной плотности, позволившая существенно упростить создание методик расчета упругодемпфирующих характеристик изделий.

5. Впервые установлено, что упругогистерезисные характеристики изделий из материала МР характеризуются множеством переходных форм: от известных, традиционных, для систем конструкционного демпфирования при одноосной траектории движения, до эллипсных, характерных для гидродинамического демпфирования, при движении вибратора по замкнутым траекториям, что даст существенное упрощение динамических расчетов для ряда конкретных систем виброзащиты.

6. Создана математическая модель многократного нагружения объектов из материала МР с произвольной матрицей амплитуд деформирования, позволившая найти закономерности смещения центров петель в зависимости от диапазонов нагружения, а также установить минимальное число циклов нагружения, при которых петли гистерезиса замыкаются, что повысило точность расчетов упругодемпфирующих характеристик виброзащитных систем.

7. С использованием разработанных алгоритмов и программ расчета, оптимизации упругодемпфирующих характеристик созданы и внедрены на ЗАО «Управляющая компания «Брянский машиностроительный завод» и ОАО «Новокуйбышевский нефтеперерабатывающий завод» патентозащищенные виброзащитные системы, позволившие существенно улучшить вибро-

рационное состояние объектов виброзащиты со значительным экономическим эффектом. Созданные алгоритмы и программы расчета используются в учебном процессе СГАУ при курсовом и дипломном проектировании.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Котов, А.С. Исследование количественных характеристик технологии изготовления изделий из материала МР [Текст] / А.С. Котов, Ю.К. Пономарев, Ф.В. Паровой // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та - Самара: СГАУ, 2006.- Ч. 2.- С. 397-401.

2. Пономарев, Ю.К. Разработка математической модели виброизолятора с шаровым упругодемпфирующим элементом из материала МР [Текст] / Ю.К. Пономарев, А.И. Ермаков, А.С. Котов и др. // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та - Самара: СГАУ, 2006.- ч.1.- С.392-397.

3. Громаковский, Д.Г. Использование жидкостей с высокой поглощающей способностью в пластинчатых виброизоляторах [Текст] / Д.Г. Громаковский, Ю.К. Пономарев, А.С. Котов, и др. // Вестн. Самар. гос. аэрокосм. ун-та - Самара: СГАУ, 2006.- ч.2.- С. 101-105.

4. Пат. 2295455 РФ, МПК В60К 5/00, В61F 1/14. Способ установки дизель-генератора на раму тепловоза [Текст] / Петров В.Ф., Волохов Г.М., Пономарев Ю.К., Котов А.С. и др.- № 2006105442/11; заявлено 21.02.06, опубл. 20.03.07, Бюл. № 8.

5. Пат. 60160 РФ, МПК F16F 13/02, F16F 5/26. Демпфирующее устройство для надбуксового подвешивания [Текст] / Громаковский Д.Г., Котов А.С., Леонов В.С. и др. - № 2006128940/22; заявлено 10.08.06, опубл. 10.01.07, Бюл. № 1.

6. Пат. 58191 РФ, МПК F16F 7/14. Виброизолятор [Текст] / Гунин В.А., Михалкин И.К., Пономарев Ю.К., Котов А.С. - № 2006121946/22; заявлено 19.06.06, опубл. 10.11.06, Бюл. № 31.

7. Пат. 50619 РФ, МПК F16F 7/14. Тросовый виброизолятор [Текст] / Гунин В.А., Пономарев Ю.К., Котов А.С. и др. Опубл. 20.01.06, Бюл. № 02.

8. Пат. 43048 РФ, МПК F16F 7/14. Тросовый виброизолятор [Текст] / Архангельский С.В., Гунин В.А., Пономарев Ю.К., Котов А.С. и др.- № 2004125937/22; заявлено 26.08.04, опубл. 27.12.04, Бюл. № 36.

9. Пат. 41346 РФ, МПК F16F 7/08. Пластинчатый виброизолятор [Текст] / Архангельский С.В., Гунин В.А., Пономарев Ю.К., Котов А.С. и др.- № 2004118929/22; заявлено 22.06.04, опубл. 20.10.04, Бюл. № 29.

10. Пат. 55310 РФ, МПК В21F 21/00. Виброизолятор [Текст] / Пономарев Ю.К., Ермаков А.И., Котов А.С. и др. - № 2006105447/22; заявлено 21.02.06, опубл. 10.08.06, Бюл. № 30.

11. Ермаков, А.И. Новые средства виброзащиты в машиностроении на основе высокодемпфированного материала МР [Текст] / А.С. Котов, Ю.К. Пономарев и др. // Сборник «Проблемы строительного и дорожного

комплексов»: сб. ст. / Брянск: БГИТА, 2006.- вып. 4.- С. 16 -19.

12. Медников, Н.В. Проектирование комбинированных средств виброзащиты на основе материала МР и тросов [Текст] / Н.В. Медников, А.С. Котов, Ю.К. Пономарев и др. // Сборник «Проблемы строительного и дорожного комплексов»: сб.ст. / Брянск: БГИТА, 2006.- вып. 4.- С. 49-51.

13. Котов, А.С. Разработка и исследование характеристик пространственного цельнометаллического виброизолятора с упругим элементом из материала МР [Текст] / А.С. Котов // Международная научно-техническая конференция «Рабочие процессы и технология двигателей»: тез. докл. / Казань: Казанский гос.техн.ун-т, 23-27 мая 2005.- С.92-94.

14. Котов, А.С. Разработка методики расчета характеристик цилиндрических опор трубопроводов из материала МР [Текст] / А.С. Котов, М.В. Медников // Международная молодежная научная конференция «XII Туполевские чтения» : тез.докл. / Казань: Казанский гос.техн.ун-т, 2004.- Т.1.- С.31-32.

15. Ponomarev, J.K. Account of the elastic and damping characteristics for pipelines support using MR material (metallic rubber) [Text] / J.K. Ponomarev, Gunin W.A., A.S. Kotov, M.V. Mednikow // IV International Congress: Mechanical Engineering Technologies 04: сб. статей / Варна: Болгария, изд-во Болгарской академии наук и международного конгресса по машиностроительным технологиям, 2004.- С. 232-235.

16. Пономарев, Ю.К. Поперечный изгиб двухслойной балки, сжатой переменной по длине сдавливающей нагрузкой [Текст] / Ю.К. Пономарев, А.С. Котов, и др. // Сборник: «Неоднородные конструкции»: сб. ст. / Челябинск: Уральское отделение РАН, 2004.- С. 10.

17. Антипов, В.А. Моделирование материала МР при прецессионном нагружении [Текст] / В.А. Антипов, Ю.К. Пономарев, А.С. Котов и др. // Самара: изд-во СамГАПС, 2004.- С. 2.

18. Ермаков, А.И. Новые материалы и технологии в машиностроении [Текст] / А.И. Ермаков, А.С. Котов // Международная интернет конференция «Новые материалы и технологии в машиностроении»: сб.ст. / Брянск: БГТУ, 2003.- С. 74-77.

19. Ермаков, А.И., Использование материала МР для виброизоляции и шумоглушения в технике [Текст] / Ю.К. Пономарев, Котов А.С. и др. // Международная конференция «Новые материалы и технологии в машиностроении»: сб. ст. / Брянск: БГТУ, 2003.- вып.2.- С. 31-34.

Котов Антон Сергеевич

**Разработка методик расчета
упругодемпфирующих характеристик
виброизоляторов из материала МР**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 01.02.06
"Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры"

Сдано в печать 29.06.07. Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л.1,0. Тираж 100 экз.
Заказ 256.