

На правах рукописи

Уланов Александр Михайлович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА  
СТАТИЧЕСКИХ, ДИНАМИЧЕСКИХ И РЕСУРСНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ  
ИЗ МАТЕРИАЛА МР**

Специальность 01.02.06 -  
Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Самара – 2009

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 консультант: доктор технических наук, профессор  
Пономарев Юрий Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук  
Волохов Григорий Михайлович  
доктор технических наук, профессор  
Клебанов Яков Мордухович  
доктор технических наук, профессор  
Павлов Валентин Федорович

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 года в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д212.215.02 при ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева» по адресу: 443086, г.Самара, Московское шоссе, 34

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева»

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.215.02  
доктор технических наук, профессор \_\_\_\_\_ Д.Л.Скуратов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Для уменьшения вибрационных и ударных нагрузок широко применяются виброизоляторы. В ряде случаев они работают в экстремальных условиях высоких и низких температур, вакуума, радиации, агрессивных сред, и должны в этих условиях сохранять работоспособность длительное (до десятков лет) время. В таких условиях применимы только цельнометаллические виброизоляторы на основе сухого трения, к которым относятся виброизоляторы из демпфирующих проволочных материалов.

Материал МР («металлическая резина»), созданный в Куйбышевском авиационном институте (ныне Самарский государственный аэрокосмический университет - СГАУ), широко применяется в аэрокосмической и железнодорожной технике, а также в химическом машиностроении для изготовления упругодемпфирующих элементов (УДЭ) виброизоляторов и демпферов. До настоящего времени создание нового виброизолятора из материала МР осуществлялось в основном на базе сравнения потребных характеристик с характеристиками уже существующих виброизоляторов. При этом требовался большой объем экспериментальных исследований, что существенно увеличивает затраты средств и времени на разработку и доводку виброзащитных систем.

Для расчета виброизоляторов из материала МР, обладающих требуемыми характеристиками, необходимо применение универсальных методов, например, метода конечных элементов, на основе которого развито много современных пакетов программ, таких, как ANSYS или NASTRAN. Однако существующие модели материала МР это сделать не позволяют.

Расчет статических характеристик существующих и проектируемых виброизоляторов, получение на этой основе динамических характеристик проектируемых виброзащитных систем, определение эквивалентных напряжений в виброизоляторах и прогнозирование ресурса и прочности виброизоляторов из материала МР возможны на основе представления о материале МР как анизотропной квазисплошной среде.

В связи с этим, работа, направленная на создание новых методов расчета статических, динамических и ресурсных характеристик виброизоляторов из материала МР и виброзащитных систем (ВС) на основе представления о материале МР как анизотропной квазисплошной среде, является весьма актуальной.

**Цель диссертационной работы** – повышение работоспособности машин и аппаратуры за счет создания новых методов расчета статических, динамических и ресурсных характеристик виброизоляторов из материала МР на основе изучения закономерностей деформирования

изделий из анизотропного прессованного проволочного материала с демпфирующими свойствами.

### **Задачи исследования:**

1. Исследовать механические упругодемпфирующие характеристики элементов из материала МР на сжатие, растяжение, сдвиг, кручение в различных по отношению к вектору прессования направлениях, выявить взаимовлияние направлений, форм и масштабов нагружения друг на друга при различных технологических параметрах элементов.

2. Обосновать необходимость применения при расчетах изделий из материала МР деформационных кривых (или эквивалентных модулей упругости); распределенных сил и моментов, моделирующих диссипативные силы при расчете методом конечных элементов; характеристик поперечной деформации. Создать методы их определения.

3. Исследовать ресурсные и прочностные характеристики виброизоляторов из материала МР при длительной вибрационной и кратковременной ударной нагрузке.

4. Создать методологию расчета виброизоляторов из материала МР, включающую методы: расчета статических и динамических характеристик виброизоляторов; проектирования ВС на их основе; расчета ресурса и прочности виброизоляторов.

5. Апробировать методологию при расчете характеристик и ресурса виброизоляторов типов АК, АМГ, ДКА, ВВ, АКП.

**Объект исследования** – процессы в виброизоляторах из материала МР при их статическом и динамическом нагружении, механические характеристики виброизоляторов, изменения этих характеристик в условиях эксплуатации при вибрационных и ударных нагрузках.

**Предмет исследования** – методы расчета статических, динамических, прочностных и ресурсных характеристик виброизоляторов из материала МР, методы проектирования ВС на их основе.

**Методы исследования.** Работа выполнена на основе классических методов теории колебаний, теории упругости. Для решения ряда задач применялся метод конечных элементов.

### **Научная новизна.**

1. Впервые созданы методы:
  - расчета статических, динамических, нагрузочных, ресурсных характеристик виброизоляторов из материала МР основных используемых в промышленности типов (АК, АМГ, ДКА, ВВ, ВВК), базирующиеся на представлении о материале МР как квазисплошной среде;
  - расчета динамических характеристик пространственной ВС с виброизоляторами из материала МР, выбора параметров виброизоляторов с

учетом ресурса, расположения точек крепления виброизоляторов;  
- расчета воздействия случайной вибрации на ВС с виброизоляторами из материала МР.

2. Сформирован новый подход к расчету прочности и ресурса виброизоляторов из материала МР на основе особенностей эквивалентных напряжений гистерезисного типа.

3. Для расчета статических и динамических характеристик виброизоляторов из материала МР определены и представлены в компактной математической форме закономерности деформирования элементов из материала МР в различных по отношению к вектору прессования направлениях.

4. Выявлено взаимовлияние направлений, форм и масштабов циклического нагружения при различных технологических параметрах виброизоляторов из материала МР.

5. Впервые введены в практику расчетов изделий из материала МР деформационные характеристики, эквивалентные модули упругости, распределенные силы и моменты сил трения, характеристики поперечной деформации, что делает возможным применение современных расчетных методов.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается корректностью постановки задач исследования, использованием научно обоснованных расчетных схем, применением апробированных аналитических и численных методов анализа и расчета, сравнением с результатами экспериментальных исследований.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Метод расчета статических характеристик виброизоляторов из материала МР с использованием нелинейной деформационной характеристики или эквивалентного модуля упругости.

2. Метод моделирования диссипативной составляющей реакции виброизолятора с конструкционным демпфированием при помощи дополнительно введенных распределенного момента или объемной силы.

3. Методы расчета проектируемых ВС с виброизоляторами из материала МР при гармонической и случайной нагрузке, рекомендации по расположению виброизоляторов и выбору их параметров.

4. Метод расчета ресурса виброизоляторов из материала МР при помощи эквивалентных напряжений и кривых выносливости.

5. Метод расчета изменения характеристик материала МР при кратковременном значительном нагружении.

6. Закономерности, описывающие влияние деформации упругодемпфирующих элементов из материала МР в различных направлениях на статические и динамические характеристики виброизоляторов.

**Практическая значимость.** Получение статических и динамических характеристик виброизоляторов из материала МР расчетным путем позволяет при проектировании новых виброизоляторов определять их потребные геометрические и технологические параметры. При проектировании новых ВС с этими виброизоляторами можно рассчитывать их характеристики при гармонической и случайной вибрационной нагрузке. Это существенно сокращает время проектирования, объем экспериментальных работ при доводке. Результаты настоящей работы позволяют также прогнозировать способность виброизоляторов выдерживать ударную и длительную вибрационную нагрузку. Это необходимо для повышения надежности ВС, обеспечивающих работоспособность сложных наукоемких машин и аппаратуры.

**Реализация результатов работы.** Результаты теоретических и экспериментальных исследований использованы при проектировании и доводке виброизоляторов ВВК.01 и ВВК.02, внедренных на ЗАО «Управляющая компания «Брянский машиностроительный завод»» и ОАО «Новокуйбышевский нефтеперерабатывающий завод», а также ряда виброизоляторов типа ВВ, серийно выпускающихся в СГАУ для аэрокосмической промышленности. Методические разработки, предложенные автором, используются в учебном процессе ГОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева» на кафедре конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов.

**Апробация результатов.** Основные положения работы докладывались и обсуждались на научных конференциях, совещаниях и симпозиумах: Всесоюзной конференции «Проблемы виброизоляции машин и приборов» (Иркутск, 1989), Всесоюзной конференции «Механика и технология изделий из металлических и металлокерамических композиционных материалов» (Волгоград, 1989), Международной конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе» (Самара, 1997), Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (Самара, 2003, 2006, 2009), Международной конференции «Новые материалы и технологии в машиностроении» (Брянск, 2003), XXVI Российской школе «Наука и технологии» (Москва, 2006), Международной конференции «Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения» (Орел, 2007), и других. Работа докладывалась на заседании Головного совета «Машиностроение» в СГАУ (2007).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 45 работ, в том числе 8 - в ведущих рецензируемых журналах и научных изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией, получен 1 патент

Российской Федерации.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, изложенных на 238 страницах машинописного текста, содержит 122 рисунка и 6 таблиц, список использованной литературы включает 186 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель диссертационной работы, характеризуется научная новизна и практическая значимость результатов исследования.

**В первом разделе** на основе опубликованных материалов анализируются современные демпфирующие проволочные материалы, конструкции виброизоляторов из данных материалов и методы их расчета.

Отечественный материал МР был разработан под руководством А.М. Соифера. Большой вклад в создание виброизоляторов из МР и совершенствование технологии их изготовления внесли Ю.И. Байбородов, А.И. Белоусов, В.Н.Бузицкий, А.Г.Гимадиев, В.П.Иванов, Г.В. Лазуткин, В.А. Першин, А.Д. Пичугин, Ю.К. Пономарев, А.А. Тройников, Л.Г.Шайморданов, В.П.Шорин и многие другие ученые и инженеры. Изделия из материала МР изготавливаются при помощи холодного прессования заготовки из растянутой проволочной спирали в окончательные по форме и размерам детали. Свойствами материала МР можно управлять в широких пределах при помощи изменения относительной плотности  $\bar{\rho}$ , предварительного статического сжатия, изменения материала проволоки, ее диаметра  $d_w$ .

За рубежом имеются аналогичные материалы: «spring cushion» («пружинная подушка»), «wire mesh damper» («демпфер из проволочной сети»). Материал «пружинная подушка» изготавливается немецкой фирмой «Stop-Choc» прессованием из проволочной ткани. Материал МР обладает дополнительной упругостью витков спирали. Проведенный автором эксперимент по сравнению материала МР и «пружинной подушки» показал, что при одинаковой плотности жесткость единицы объема материала МР существенно выше. Поэтому можно применять меньшее количество виброизоляторов или УДЭ меньшего размера. Ресурс и демпфирующие свойства виброизоляторов из обоих материалов одинаковы.

Существует большое количество конструкций виброизоляторов из проволочных демпфирующих материалов. Втулочные виброизоляторы (рис.1, а) обладают высокой статической и динамической прочностью, простотой и технологичностью, малыми габаритами и массой. Материал в них работает на сжатие и сдвиг. Виброизоляторы с УДЭ колокольчиковой формы (рис. 1, б) имеют меньшую анизотропию характеристик,

низкие резонансные частоты, высокое демпфирование. Для увеличения прочности и ресурса виброизоляторов колокольчиковые элементы армируются проволочным жгутом. Для разгрузки втулочных и колокольчиковых виброизоляторов в их конструкцию могут входить пружины.

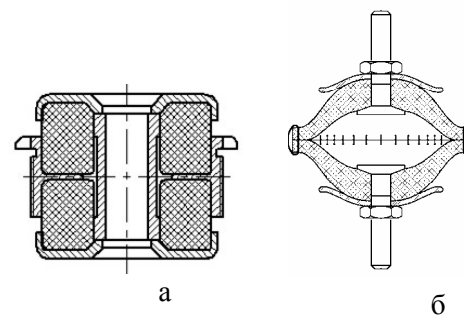


Рис. 1. Виброизоляторы из МР:

а – втулочный; б – колокольчиковый

принимать пространственную нагрузку, как это сделано в разработанном с участием автора кольцевом пространственном виброизоляторе типа

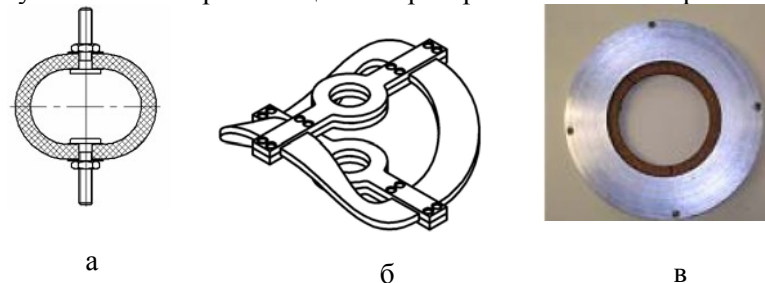


Рис. 2. Кольцевые виброизоляторы.

а – тип АМГ; б – тип АКП; в – демпфер вала.

АКП (рис. 2, б). Материал МР работает в таких кольцах на изгиб. Если кольцевые УДЭ применяются для демпфирования валов или трубопроводов, материал в них работает на сжатие (рис. 2, в).

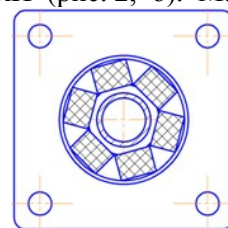


Рис. 3. Сегментный виброизолятор

В сегментных виброизоляторах (рис.3) массив материала МР не представляет собой единого целого. Сегменты чаще всего имеют вид прямоугольных параллелепипедов или цилиндров. В таких виброизоляторах материал МР работает в направлении прессования, что считается оптимальным. Применение сегментов позволяет также экономить массу виброизолятора и материал,

снизить затраты на изготовление пресс-форм. Применяются УДЭ специальной формы, в которых виброизолятор находится в сложном напряженном состоянии. Так, в опоре трубопровода (рис. 4) материал вокруг трубы работает на сжатие, а между трубой и крепежным болтом – на изгиб.

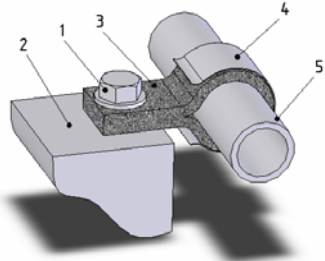


Рис.4. Опора трубопровода:  
1 – крепежный болт,  
2 – основание, 3 – УДЭ из МР,  
4 – прижимная пружина,  
5 – трубопровод

Существуют следующие направления описания упругодемпфирующих характеристик изделий из материала МР. Физическое моделирование основано на статистическом (модели А.М.Сойфера, Л.Г.Шайморданова и др.) или детерминистском (модели А.И.Белоусова, А.А.Тройникова, С.Д.Бараса и др.) подходе. Эти модели раскрыли некоторые качественные закономерности процессов, протекающих в материале при его изготовлении и работе в виброизоляторе. Но выражения, описывающие процессы деформации этих моделей, очень громоздки. Недостаточная изученность и неопределенность многих параметров требует большого объема экспериментальных и вычислительных работ для определения констант моделей и отрицательно сказывается на их точности. Математическое моделирование (работы В.А.Борисова, Е.А. Панина, И.М.Волка, Г.В.Лазуткина и др.) основано на аппроксимации математическими выражениями экспериментально полученных нагрузочных характеристик конкретных типов виброизоляторов. При этом не требуется детальное изучение взаимодействия отдельных элементов в структуре МР, граничных условий закрепления и т.д. Эти модели позволяют получить компактные уравнения, пригодные для описания упругофрикционных характеристик и расчета динамических процессов. Однако для получения их коэффициентов необходим эксперимент с уже существующим виброизолятором, для разработки нового виброизолятора они мало пригодны.

Очень мало работ о прочности материала МР. Существующие работы или основаны на слишком приближенных допущениях (Д.Н.Решетов, О.А.Ряховский и М.В.Фомин), или применимы только к одному типу виброизоляторов (А.А.Тройников, Г.В.Лазуткин). Еще меньше исследований ресурса изделий из материала МР. При проектировании ВС в большинстве существующих методов проектирования нелинейная пространственная ВС рассматривается либо как линейная, либо как совершающая однонаправленные колебания. Отсутствие методов расчета

пространственных нелинейных ВС сдерживает и развитие методов их проектирования. Практически отсутствуют методы расчета расположения точек крепления виброизоляторов.

**Во втором разделе** излагается разработанная автором методология исследования и расчета механических характеристик элементов из материала МР. В данной работе предлагается рассматривать материал МР как анизотропную квазисплошную среду, а напряжение в материале МР - как сумму упругой и диссипативной составляющих.

Материал МР является одновременно анизотропным, нелинейным и гистерезисным. Существенная анизотропия свойств материала МР в направлении вектора прессования и в перпендикулярном направлении, а также наличие значительных ( $\varepsilon \leq 0,25 \dots 0,3$ ) деформаций в элементах из материала МР в процессе их эксплуатации ограничивает возможность применения к материалу МР методов классической механики деформируемого твердого тела. Но при работе на сдвиг, изгиб, кручение он имеет упругую характеристику, близкую к линейной, его диссипативные силы при этом также мало зависят от деформации. Поскольку в плоскости, перпендикулярной направлению вектора прессования (принятому в настоящей работе за ось X), свойства материала МР одинаковы во всех направлениях, материал МР является трансверсально изотропным. С учетом этого коэффициенты поперечной деформации материала МР  $\mu_{xy} = \mu_{xz}$ ;  $\mu_{yz} = \mu_{zy}$ ;  $\mu_{zx} = \mu_{yx}$ . Нелинейность и гистерезис учитываются в настоящей работе в виде функций влияния, описывающих упругую и диссипативную составляющие напряжения.

В общем случае напряжения в материале МР выражаются в виде:

$$\sigma_{ij} = \Phi(\varepsilon_{kl}, \dot{\varepsilon}_{kl}),$$

где  $\varepsilon_{kl}$  - относительная деформация,  $\dot{\varepsilon}_{kl}$  - скорость деформации (для системы конструкционного демпфирования, какой является материал МР, скорость включена в уравнение для учета направления диссипативной силы), индексы  $i, j, k, l$  последовательно принимают значения от 1 до 3.

Располагая функциями влияния, можно рассчитывать материал МР методом последовательных приближений, корректируя получаемые на предыдущем шаге расчета напряжения. Экспериментальное определение этих функций, а также коэффициентов поперечной деформации было задачей выполненного в настоящей работе исследования материала МР как квазисплошной среды.

Для эксперимента были использованы элементы из материала МР в виде параллелепипеда с высотой  $H$  и размерами основания  $a \times a$  мм. Для того, чтобы было правомерно рассматривать материал МР как квазисплошную среду, выдерживалось значение критерия подобия  $H/d_w \geq 100$ . Поскольку ранее приложенная значительная деформация изменяет структуру материала МР и его свойства, вначале исследовалась стабильность структуры материала МР в различных направлениях. Установлено, что в направлении вектора прессования при больших деформациях материал МР стабилизируется, и свойства его остаются в дальнейшем неизменными. Поэтому в технологический процесс изготовления виброизолятора из МР и в эксперимент рекомендуется включить операцию стабилизации – нагружение 5...10 раз в этом направлении до деформации хотя бы  $\varepsilon_{\max} = 0,2$ . Исследование показало, что в направлении осей  $Y$  и  $Z$  свойства материала МР продолжают меняться с увеличением  $\varepsilon_{\max}$ . Для стабилизации свойств материала также необходимо нагружение 5...10 раз в направлении оси  $Y$  до деформации, превышающей рабочую. Ширина петли гистерезиса почти не зависит от ранее приложенной деформации. Это означает, что ранее приложенная деформация влияет на жесткость материала, а не на силу трения в нем.

При определении характеристик на сжатие элементы из МР подвергались нагружению пульсирующего типа. Далее полученные упруго-гистерезисные циклы перестраивались в координаты «относительная деформация – напряжение». За упругую составляющую принималось среднее напряжение  $\sigma_L = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$ , за диссипативную – половина толщины петли в направлении напряжений  $\sigma_H = (\sigma_1 - \sigma_2)/2$  (здесь  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  - экспериментально определенное напряжение соответственно на процессах нагрузки и разгрузки). Около точки смены знака скорости нагружения в петле существует зона предварительных смещений, в которой эти выражения не справедливы, поэтому упругая и диссипативная составляющие определялись не во всем диапазоне деформаций, а только в диапазоне  $[0,7A_{\min}; 0,7A_{\max}]$  (здесь  $A_{\min}$  и  $A_{\max}$  - соответственно, минимальная и максимальная амплитуды деформации). Для направления  $X$  этот диапазон составил  $\varepsilon_x \in [-0,06; 0,24]$ , направлений  $Y$  и  $Z$  -  $\varepsilon_x \in [-0,06; 0,16]$ .

Полученные зависимости для диапазона  $\bar{\rho} \in [0,18; 0,35]$  аппроксимировались полиномами вида:

$$\sigma_{Lx} \approx (11 + 33\varepsilon_x - 376\varepsilon_x^2 + 2950\varepsilon_x^3)\bar{\rho}^{1,7}, \text{ МПа};$$

$$\sigma_{Hx} \approx (0,1 + 1,3\varepsilon_x + 0,38\varepsilon_x^2 + 43\varepsilon_x^3)\bar{\rho}, \text{ МПа};$$

$$\sigma_{Ly} \approx (83 + 438\varepsilon_y + 4290\varepsilon_y^2 - 19510\varepsilon_y^3)\bar{\rho}^2, \text{ МПа};$$

$$\sigma_{Hy} \approx (1,1 + 15\varepsilon_y + 120\varepsilon_y^2 - 310\varepsilon_y^3)\bar{\rho}^{1,7}, \text{ МПа}.$$

Зависимости для направления  $Z$  аналогичны зависимостям для направления  $Y$ .

Для определения характеристик материала МР на сдвиг автором была разработана установка, позволяющая осуществлять нагружение элементов одновременно в двух направлениях (рис.5). Одновременно испытывались два одинаковых элемента 1, чтобы исключить перекося.

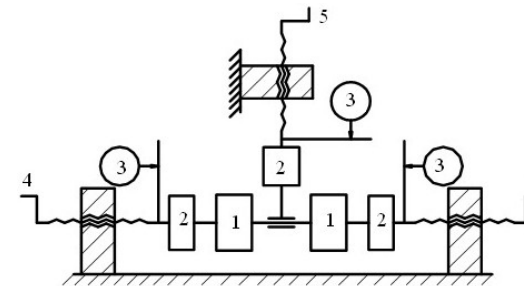


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для нагружения элементов из материала МР в двух направлениях

нагружение производилось винтовыми парами с рукоятками: 4 – в одном направлении, 5 – в другом направлении. Перемещение измерялось датчиками 3, сила – электрическими динамометрами 2. Как показали исследования, деформирование элементов 5-10 раз до амплитуды  $\gamma_{\max} = 0,12$

достаточно для стабильности свойств материала в дальнейшем. Контактные поверхности элементов приклеивались к жестким поверхностям. Элементы подвергались нагружению симметричного типа. С учетом зоны предварительных смещений, диапазон определения упругой и диссипативной составляющих составлял  $\gamma \in [-0,12; 0,12]$ .

Петля гистерезиса при сдвиге сравнительно близка к линейной, поэтому напряжения при сдвиге можно представить как сумму напряжения от упругих сил  $G\gamma$  (где  $G$  – эквивалентный модуль упругости при сдвиге) и напряжения от неупругих сил  $\tau_H$ . В результате эксперимента для направления  $XY$  получены результаты, аппроксимированные зависимостями  $G_{xy} \approx 6,65\bar{\rho}^{1,7}$ , МПа;  $\tau_{Hxy} \approx 0,107\bar{\rho}^{1,1}$ , МПа;  $G_{yz} \approx 18,3\bar{\rho}^{1,7}$ , МПа;  $\tau_{Hyz} \approx 0,213\bar{\rho}^{1,1}$ , МПа.

Эксперимент по определению влияния деформации в одном направ-

лении на характеристики в другом направлении также проводился на установке, показанной на рис. 5. Полученные функции влияния также аппроксимировались полиномами.

В работе показано, что для получения контура петли гистерезиса необходимо также учесть деформацию материала МР в зонах предварительных смещений. Для этого можно воспользоваться результатами работ Ю.К. Пономарева. Если сжатие элемента из материала МР осуществляется из точки  $(\sigma_0, \varepsilon_0)$ , то любой процесс с таким началом можно представить в виде

$$\sigma(\varepsilon, \varepsilon_0, \kappa) = \sigma_L(\varepsilon) + (-1)^{\kappa+1} \sigma_H(\varepsilon) + (-1)^\kappa 2\sigma_H(\varepsilon_0) \exp[-5|\varepsilon - \varepsilon_0|/a_0(\varepsilon_0)].$$

Здесь параметр  $\kappa = 1$  соответствует процессу нагрузки,  $\kappa = 2$  – процессу разгрузки,  $a_0$  – остаточная деформация, определенная в виде отрезка, отсекаемого граничными процессами  $\sigma_1(\varepsilon)$  и  $\sigma_2(\varepsilon)$ , аппроксимированная функцией  $a_0(\varepsilon) = (6\varepsilon - 107\varepsilon^2 + 1030\varepsilon^3 - 4860\varepsilon^4 + 10690\varepsilon^5 - 8840\varepsilon^6)\bar{\rho}$ .

При сдвиге любой процесс из точки  $(\tau_0, \gamma_0)$  можно представить в виде  $\tau(\gamma, \gamma_0, \kappa) = G\gamma + (-1)^{\kappa+1} \cdot \tau_H + (-1)^\kappa \cdot 2\tau_H \cdot \exp[-5|\gamma - \gamma_0/\gamma_0|]$ . Эти уравнения позволяют построить произвольную петлю гистерезиса любого, в том числе проектируемого УДЭ из материала МР.

Таким образом, можно использовать весь инструментарий, накопленный при математическом моделировании виброизоляторов из материала МР. В частности, можно построить поле петель гистерезиса виброизолятора, получить по нему коэффициенты математической модели деформирования и рассчитывать произвольный процесс деформирования виброизолятора во времени, численно интегрируя уравнение движения ВС. Построив петли гистерезиса с различными амплитудами деформации, можно получить нелинейные зависимости жесткости виброизолятора и коэффициента рассеивания энергии от амплитуды деформации. Эти зависимости можно использовать для расчета динамических характеристик ВС с виброизоляторами из материала МР приближенными линеаризованными методами.

Был проведен также эксперимент по определению характеристик поперечной деформации материала МР, аналогичных коэффициенту Пуассона. Влияние силы, приложенной в направлении X, на деформацию в направлении Y, очень мало: в рабочем диапазоне ( $\varepsilon_x \leq 0,16$ )

$\mu_{xy} = \mu_{xz} \leq 0,03$ . При сжатии образца в направлении Y в направлениях X и Z наблюдаются значительные петли гистерезиса. Если взять значения  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_x$  (или, соответственно,  $\varepsilon_y$  и  $\varepsilon_z$ ) при одинаковом  $\sigma_y$  на нагрузоч-

ной или разгрузочной ветви этих петель, можно перестроить петли в ко-

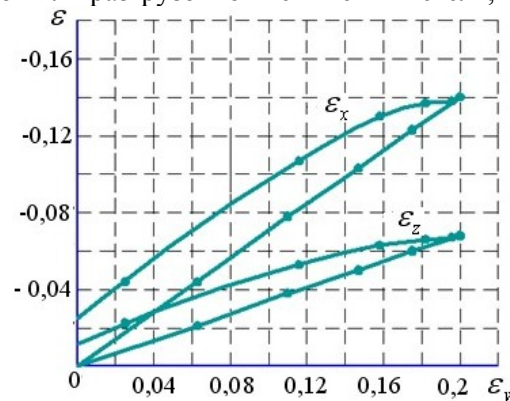


Рис.6. Характеристики поперечной деформации в направлениях X и Z при сжатии в направлении Y

ординаты  $\varepsilon_y - \varepsilon_x$  (или  $\varepsilon_y - \varepsilon_z$ ) (рис.6). Перестроенные петли можно описать приближенно в виде

$$\varepsilon_x \approx -0,68\varepsilon_y + (0,32 - 0,85\bar{\rho})\varepsilon_{y \max};$$

$$\varepsilon_z \approx -0,34\varepsilon_y + (0,16 - 0,4\bar{\rho})\varepsilon_{y \max}$$

Коэффициент при  $\varepsilon_y$  (или  $\varepsilon_z$ ) – это коэффициент поперечной деформации, второе слагаемое – остаточная поперечная деформация (учитывается только при разгрузке). Таким образом,  $\mu_{zx} = \mu_{yx} = 0,68$ ;  $\mu_{yz} = \mu_{zy} = 0,34$ .

Поскольку значительная доля энергии рассеивается при трении материала МР о стальные детали конструкций виброизоляторов, в работе выполнено исследование по определению коэффициента трения материала МР по стали  $f_{mp}$ . Установлено, что он независим от плотности материала и направления силы относительно вектора прессования. При малых значениях напряжения прижатия  $\sigma_{np} \approx 0$  значение  $f_{mp} = 0,1$ , далее оно слабо растет и после  $\sigma_{np} \approx 0,75$  МПа остается равным 0,125.

В работе исследовано также влияние переменной нагрузки на виброизолятор в одном направлении на его упругодемпфирующие характеристики в другом направлении. Это особенно важно для материала МР, поскольку трение в нем обусловлено контактным взаимодействием проволок, а даже небольшая боковая вибрация может смещать контактирующие проволоки. Существующие вибростенды способны осуществлять вибрационную нагрузку только в одном направлении. Поскольку для расчета динамических характеристик виброизоляторов из МР успешно используются данные, получаемые при статических испытаниях, предлагается воспользоваться результатами статического эксперимента и в данном случае, моделируя воздействие вибрации статической знакопеременной нагрузкой. На экспериментальной установке (рис. 5) элементы из МР деформировались одновременно в двух направлениях, ступенчато на

сжатие (ось X) и на сдвиг (ось Y).

Для исследования влияния вибрации в направлении оси Y на характеристики в направлении оси X была получена петля гистерезиса в направлении X с амплитудой  $\varepsilon_x = 0,08$  около положения статического равновесия  $q_x = 0,16$  с шагом изменения деформации  $\Delta\varepsilon_x = 0,002$ . На нее накладывалась переменная сдвиговая деформация в направлении Y с шагом  $\Delta\gamma_y = 0,002$ , с амплитудами  $\gamma_y = 0,002$  и  $\gamma_y = 0,02$ , полный цикл приложения которых был соответственно в 10 и в 4 раза меньше, чем цикл нагружения по оси X (рис. 7). Несмотря на столь значительное раз-

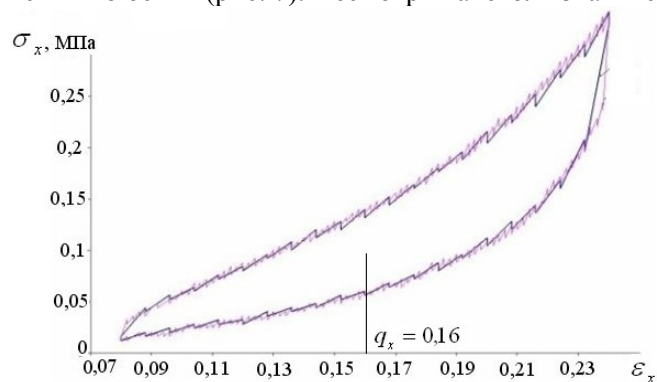


Рис. 7. Петля гистерезиса в направлении X при наложении переменной нагрузки в направлении Y.

личие возмущающей боковой нагрузки (в 10 раз по амплитуде и в 2,5 раза по «частоте» (принимая за единицу «частоты» цикл нагружения по оси X), полученные петли гистерезиса в направлении оси X не отличаются по жесткости и различаются менее чем на 2% по площади петли.

Деформация сжатия изменяет количество контактов проволок МР и давление в отдельном контакте, поэтому воздействие сжатия на вибрацию в направлении сдвига несколько сильнее. При различных возмущающих боковых нагрузках, различающихся в 10 раз по амплитуде и в 10 раз по «частоте», жесткость для петель с возмущающей нагрузкой уменьшается на 6...8%, коэффициент рассеивания энергии до 2%. Но это также не превышает различия характеристик виброизоляторов из МР по технологическим причинам. Следовательно, в практике применения виброизоляторов из МР можно не опасаться изменения их характеристик в направлении одной оси при воздействии малой возмущающей вибрации в направлении другой оси.

**В третьем разделе** излагается разработанная автором методология расчета виброизоляторов из МР методом конечных элементов. В большинстве реальных конструкций виброизоляторов напряженное состояние материала МР имеет не так много компонент, и общие деформационные характеристики можно упростить. Следует также разделять нелинейность, вызванную нелинейностью материала МР, и геометрическую нелинейность конструкции виброизолятора. При расчете кольцевых или колокольчиковых виброизоляторов, которым свойственны большие деформации, целесообразно рассматривать материал МР как квазисплошную среду с некоторым эквивалентным модулем упругости, и рассчитывать нагрузочные характеристики, используя метод конечных элементов или иные подходы, отработанные в механике деформируемого твердого тела. Геометрическая нелинейность детали будет учитываться в таком расчете автоматически. Для разработки метода определения эквивалентного модуля упругости рассмотрим кольцевой виброизолятор.

Для изгиба колец из материала МР (рис. 2, а) эквивалентный модуль упругости  $E$  предлагается определять при помощи известной формулы для деформации кольца из линейного материала

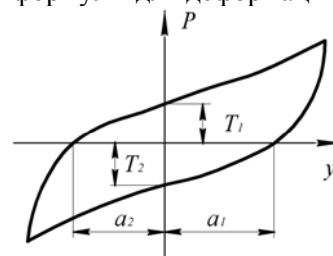


Рис. 8. Петля гистерезиса виброизолятора из МР

$$\delta_y = \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi}\right) \frac{PR^3}{EJ_x} \quad (\text{где } P - \text{ сила, } R - \text{ радиус кривизны кольца, } J_x - \text{ момент инерции сечения кольца}).$$

Жесткость кольца без учета силы трения около положения равновесия  $C_p = P/\delta_y$  можно экспериментально определить как так называемую расслоенную жесткость по формуле  $C_p \approx (T_1 + T_2)/(a_1 + a_2)$ , где  $T$  и

$a$  - отрезки, отсекаемые петлей гистерезиса соответственно на осях силы и деформации (рис. 8), и рассчитать эквивалентное значение  $E$ . Как показали исследования, оно зависит от относительной плотности материала МР и от диаметра проволоки  $\bar{d}_w: E \approx 105\bar{d}_w(54,1\bar{\rho} - 1,38)$ , МПа.

Для расчета нелинейной нагрузочной характеристики кольцевого виброизолятора из МР использовалась конечно-элементная программа ANSYS. Один из результатов сравнения расчета и эксперимента приведен на рис. 9. Погрешность определения прогиба виброизолятора по средней линии петли в рабочем диапазоне не превышает 7%, что при-



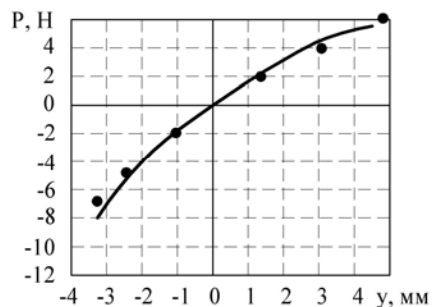


Рис. 9. Нагрузочная характеристика кольцевого виброизолятора

венной формы АКП (рис. 2, б). Такой виброизолятор слишком сложен для

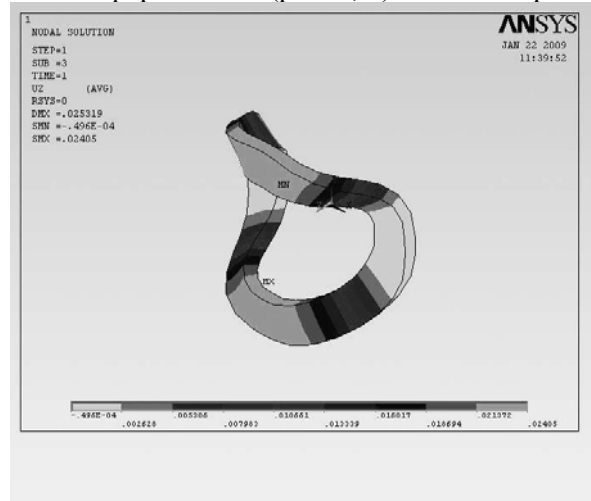


Рис. 10. Расчет виброизолятора АКП

перемещение вдоль оси Z. Действующая сила рассчитывалась как сумма реакций по оси Z в узлах, находящихся в пределах элемента крепления. Вид изогнутого УДЭ представлен на рис.10, нагрузочная характеристика виброизолятора – на рис. 11.

У виброизолятора колокольчикового типа упругий элемент представляет собой конус криволинейного сечения. В работе принята гипотеза, состоящая в том, что эквивалентный модуль упругости может быть оп-

водит к погрешности 3,5% при определении резонансной частоты, что можно считать удовлетворительной точностью, так как различие характеристик виброизоляторов из материала МР по технологическим причинам составляет около 10%.

Для проверки применимости разработанного подхода была рассчитана в пакете ANSYS нагрузочная характеристика кольцевого виброизолятора с УДЭ пространственной формы АКП (рис. 2, б). Такой виброизолятор слишком сложен для

расчета аналитическими методами, тем более, что неизвестен вид, который кольцо примет после установки в элементы крепления. Первоначально выполнялась виртуальная сборка кольца – его деформирование, аналогичное деформированию при установке в элементы крепления. При расчете нагрузочной характеристики одному из элементов крепления задавалось различное

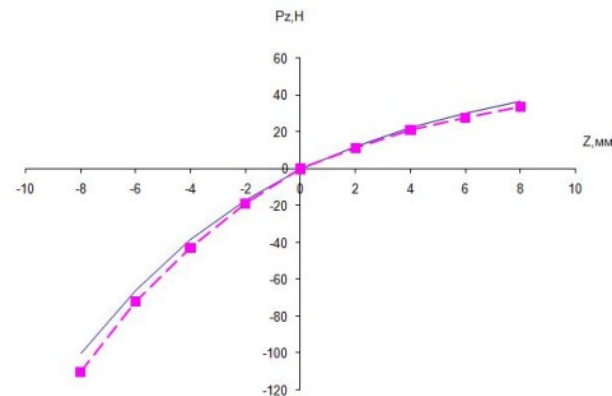


Рис. 11. Экспериментально полученная и расчетная упругие линии виброизолятора АКП

мы ANSYS нагрузочные характеристики в осевом и радиальном направлениях с погрешностью соответственно не более 6% и 8,6%. Таким образом, метод, основанный на эквивалентном модуле упругости, позволяет рассчитывать нагрузочную характеристику в любом направлении.

Учет диссипативных сил при расчете изделий из материала МР методом конечных элементов чрезвычайно сложен. В применении к демпфирующим проволоочным материалам расчет с использованием коэффициента демпфирования, являющегося аналогом вязкого трения, дает большие погрешности при определении жесткости. Неясно, как выбирать величину этого коэффициента для конкретного конечного элемента. В связи с этим в настоящей работе предлагается моделировать диссипативные силы при деформировании изделий из материала МР при помощи приложения распределенных сил, направленных противоположно скорости деформации. При изгибе элементов из материала МР это изгибающий момент, распределенный вдоль длины упругой линии элемента, при кручении – распределенный крутящий момент, при растяжении-сжатии и сдвиге – распределенная по объему элемента сила. Моделирующие силы можно получить из рассмотрения деформации систем конструкционного демпфирования. В работе установлено, что в двухслойной консоли, сжатой равномерно распределенной сдвливающей нагрузкой (задача Гудмана-Клампа) это погонный момент  $m_H$ , равный обобщенной силе трения  $T$ . В криволинейной упругодемпфирующей балке радиусного очертания с угловой протяженностью в  $1/4$  окружности  $m_H = \pi T / 4$ . Распределение этого момента по узлам конечных элементов позволяет моделировать диссипативную силу с удовлетворительной (5...8%) точностью.

ределен на основе аналитического решения задачи о деформировании упругого тела более простой формы (конического кольца с распределенными нагрузками) и эксперимента. Получено значение эквивалентного модуля упругости и рассчитаны при помощи программ

При кручении цилиндрической втулки с высотой  $H$  для моделирования диссипативной силы предлагается использовать погонный момент  $m_{кр}$ , равномерно распределенный по высоте втулки.

Воспользовавшись интегралом Мора, можно получить  $m_{кр} = 2T / H$ .

Если разделить диссипативные составляющие напряжения при сжатии  $\sigma_H$  и сдвиге  $\tau_H$ , полученные при помощи деформационных характеристик из раздела 2, на высоту рассчитываемой детали  $H$ , полученный параметр будет иметь размерность Н/м<sup>3</sup>, которая совпадает с размерностью распределенной по объему силы от веса  $\rho g$  (здесь  $g$  – ускорение силы тяжести), легко задаваемой в ANSYS.

**В четвертом разделе** рассмотрен метод расчета ресурса и прочности виброизоляторов из материала МР. Основными характеристиками, которые виброизоляторы должны обеспечивать в составе ВС, являются резонансная частота  $f_0$  и коэффициент передачи вибрации  $\eta$ . Они регламентируются техническими условиями (ТУ) на выпускаемые виброизоляторы с допуском обычно около 20%. Поэтому предлагается далее использовать отклонение  $f_0$  и  $\eta$  на резонансе от начальных более чем на 20% как критерий параметрического отказа виброизолятора.

Для исследования особенностей работы материала МР на сжатие в направлении вектора прессования были использованы виброизоляторы с УДЭ элементами втулочного типа. Для исследования влияния на ресурс твердой смазки в некоторые образцы вводился графит или MoS<sub>2</sub>. Вес твердой смазки составлял 1,2 % веса втулки. Характер износа материала МР при различных нагрузках существенно отличается. При больших напряжениях сжатия (0,7...0,9 МПа), ведущих к быстрому разрушению виброизолятора (N<100000 циклов), продукты износа состоят из кусков проволоки. При малых напряжениях (0,45...0,5 МПа), допускающих длительную работу виброизолятора (N>1000000 циклов) продукты износа состоят только из тонкого порошка окалины.

Работа материала МР на сдвиг исследовалась также при помощи виброизоляторов с втулочными УДЭ. Установлено, что в первые  $5 \cdot 10^4$  циклов работы  $f_0$  и  $\eta$  на резонансе меняются более, чем за последующие  $10^6 - 3 \cdot 10^6$  циклов. Это можно объяснить спрессовыванием материала МР в начале работы в направлении сдвига. Поэтому при высоких требованиях к  $f_0$  необходима динамическая стабилизация виброизолятора при его работе в течение хотя бы  $5 \cdot 10^4$  циклов при нагруз-

ке, сопоставимой с ожидаемой максимальной. Для исследования работы материала МР в направлении, перпендикулярном вектору прессования, были использованы сегменты в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами  $10 \times 20 \times 14$  мм. Шесть таких сегментов устанавливались по окружности вместо одной втулки (см. рис. 3). В данном направлении начальные изменения, связанные со стабилизацией структуры материала, еще больше, чем при сдвиге. В первые 20000 циклов работы резонансная частота уменьшается на 20 %, коэффициент передачи – на 28 %. Поэтому динамическая стабилизация при использовании материала МР в этом направлении также необходима.

Предлагаемый подход к МР как к квазисплошному материалу открывает возможность применения для оценки динамической прочности виброизоляторов из МР параметров, аналогичных применяемым для обычных материалов – пределов выносливости  $\sigma_{-1}$  и  $\tau_{-1}$ .

Материал МР в виброизоляторах при их сборке обычно имеет предварительное сжатие  $q$ . Напряжение от этого сжатия  $\sigma_q$  соответствует среднему напряжению нагрузочного цикла  $\sigma_m$  в известной формуле для расчета запаса прочности при циклическом нагружении  $K = \sigma_{-1} / (\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m)$ . Так как для материала МР понятия «предел текучести» не существует, в работе принято определение параметра  $\psi_\sigma$  по Гудману, т.е.  $\psi_\sigma = \sigma_{-1} / \sigma_B$ , где  $\sigma_B$  – предел прочности. Из сопоставления двух произвольно выбранных из серии образцов с одинаковым ресурсом, но с разными параметрами  $\sigma_a$  и  $\sigma_q$ , экспериментально установлено, что для материала МР коэффициент  $\psi_\sigma \approx 0,4$ . С учетом этого результата, принятого критерия параметрического отказа и схематизации диаграммы предельных амплитуд по Гудману экспериментально получена кривая выносливости для материала МР, изготовленного по типовой технологии и работающего на сжатие (рис. 12, кривая 2). Дополнительные исследования по влиянию относительной плотности  $\bar{\rho}$ , относительного диаметра проволоки  $\bar{d}_w$  и твердой смазки дали возможность установить закономерность  $\sigma_{-1} = f(\bar{d}_w, \bar{\rho}, N)$  в виде

$$\sigma_{-1} = k_{cm} (0,65 + 3,5\bar{d}_w) \bar{\rho}^{1,7} (56,6 - 14,2 \log N + 1,03(\log N)^2), \text{ МПа.}$$

Полученные автором кривые выносливости материала МР на сдвиг в направлении ХУ и на сжатие в направлении, перпендикулярном вектору прессования, также приведены на рис.12.

При использовании твердой смазки значение  $\eta$  на резонансе несколько увеличивается (около 20 %). Однако предел выносливости существенно возрастает. Учет влияния смазки на предел выносливости в формуле  $\sigma_{-1} = f(\bar{d}_w, \bar{\rho}, N)$  можно приближенно коэффициентом  $k_{см}$ , который для графита равен 1,5, а для  $MoS_2$  - 1,47.

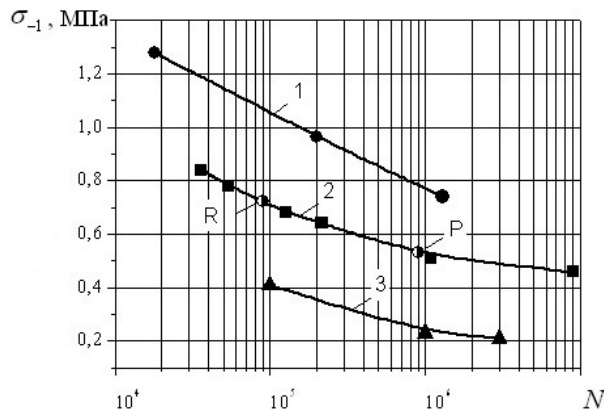


Рис.12. Кривые выносливости материала МР: 1 – в направлении, перпендикулярном вектору прессования; 2 – в направлении вектора прессования; 3 – на сдвиг; точки R и P – кольцевой виброизолятор в пакете ANSYS рассчитаны эквивалентные напряжения в его УДЭ. Ресурс (точки R и P, рис. 12) хорошо соответствует кривой выносливости.

Кратковременная ударная нагрузка может изменить параметры материала МР так, что он перестанет обеспечивать нужные характеристики. Для выяснения влияния разовых ударных нагрузок на характеристики материала МР был проведен специальный эксперимент. В нем вначале определялась петля гистерезиса с амплитудой, соответствующей рабочим областям виброизолятора при вибрации (для сжатия в направлении осей X и Y, а также для сдвига эта амплитуда составляла 1 мм, для растяжения 2 мм), определялись соответствующие ей исходные значения жесткости  $C_0$  и коэффициента рассеивания энергии  $\psi_0$ . Затем к образцу прикладывалась повышенная нагрузка. После ее снятия определялась петля гистерезиса с прежней амплитудой, определялись ее изменившиеся значения жесткости  $C_1$  и коэффициента рассеивания энергии  $\psi_1$ .

Рассчитывалось изменение этих параметров относительно исходных ( $\bar{C} = C_1 / C_0$  и  $\bar{\psi} = \psi_1 / \psi_0$ ). Затем к образцу прикладывалась повышенная нагрузка со следующим значением, вновь контролировалась петля

гистерезиса со стандартной амплитудой и так далее. Поскольку свойства материала МР значительно зависят от относительной плотности, а она зависит от давления прессования при изготовлении материала  $\sigma_{press}$ , все нагрузки были приведены к относительным значениям посредством деления на  $\sigma_{press}$  ( $\bar{\sigma}_X = \sigma_X / \sigma_{press}$  - относительное напряжение сжатия в направлении оси X, и т.д.).

В ходе проведенных исследований установлено, что изменение жесткости при сжатии в направлении вектора прессования может быть представлено зависимостью  $\bar{C}_X \approx 1,04 - 1,1\bar{\sigma}_X$ , при растяжении  $\bar{C}_T \approx 1,02 - 34,6\bar{\sigma}_T^2$ , при сдвиге  $\bar{C}_S \approx 1,05 - 25\bar{\tau}_S$ , при сжатии в направлении, перпендикулярном вектору прессования  $\bar{C}_Y \approx 1,12 - 8,1\bar{\sigma}_Y$ . Относительные изменения коэффициента рассеивания энергии при сжатии в направлении вектора прессования для  $\bar{\sigma}_X < 0,5$ , при растяжении для  $\bar{\sigma}_T < 0,1$ , при сдвиге для  $\gamma \leq 0,12$  не превышают отклонений характеристик виброизоляторов по технологическим причинам. При сжатии в направлении, перпендикулярном вектору прессования, коэффициент рассеивания энергии относительно стабилен только до нагрузки  $\bar{\sigma}_Y \leq 0,04$ , далее уменьшение более значительно и зависит от  $\bar{\rho}$ . Изменение жесткости виброизолятора, приводящее к изменению его резонансной частоты более чем на 20%, происходит при сжатии в направлении оси X при нагрузке, составляющей 36% от напряжения прессования, при растяжении – при нагрузке 10%, при сжатии в направлении оси Y – 6%, при сдвиге 1,6% от напряжения прессования. Это ограничивает применение материала МР при сдвиге и в направлении оси Y (хотя в этом направлении значительно больше несущая способность материала МР).

Было исследовано также влияние жесткости разгрузочных пружин на ресурс втулочного виброизолятора. Эксперимент позволяет сделать вывод, что для увеличения ресурса жесткость разгрузочной пружины должна быть в 1,5 – 2 раза больше жесткости УДЭ.

В пятом разделе рассмотрены методы проектирования ВС с виброизоляторами из материала МР. Получение расчетным путем зависимостей жесткости  $C$  и коэффициента рассеивания энергии  $\psi$  виброизолятора от амплитуды деформации в различных направлениях дает возможность создать методику расчета произвольных пространственных колебаний ВС для проектируемых виброизоляторов. Записав реакцию виброизолятора в комплексном виде  $P = (1 + i\gamma)CA$  (где  $i = \sqrt{-1}$ ;

$\gamma = \psi / 2\pi$ ), используя полученную В.С. Ильинским систему уравнений, описывающую колебания ВС с шестью степенями свободы, можно получить уравнения для амплитуд деформации каждого виброизолятора. Для учета зависимости  $C$  и  $\psi$  от амплитуды деформации применим метод последовательных приближений. Сравнение результатов расчета и эксперимента для ВС с 4 виброизоляторами типа ДКА показывает пригодность данной методики для практических целей.

Для оптимизации расположения виброизоляторов на этапе проектирования ВС в работе рассмотрена задача сближения ее собственных частот в пределы возможно меньшего заданного диапазона  $[\omega_{\min}; \omega_{\max}]$ . В этом случае увеличивается частотный диапазон, в котором ВС обеспечивает уменьшение амплитуды колебаний. Для случая виброизоляторов, расположенных в плоскости ОХУ, получена система

неравенств для величин  $\mathcal{G} = \sum_{j=1}^n l_{1j}^2$  и  $\theta = \sum_{j=1}^n l_{2j}^2$  (здесь  $j$  – номер вибро-

изолятора,  $l_{1j}$  и  $l_{2j}$  – координаты центра жесткости этого виброизолятора в направлении X и Y соответственно). При выполнении этих неравенств резонансные частоты ВС находятся в требуемом диапазоне.

С учетом требований к ВС и ее ресурсу можно получить область существования ВС в координатах  $C_k - \psi_k$  (где  $C_k$  – жесткость упругой характеристики,  $\psi_k$  – коэффициент рассеивания энергии в  $k$ -ом направлении). В работе показано, что из решения уравнения колебаний для выполнения ограничений по допускаемому ускорению при вибрации  $[W_{kv}]$ , допускаемому перемещению защищаемого объекта  $[X_k]$  и по резонансной частоте, которая должна принадлежать диапазону  $[f_{k\min}; f_{k\max}]$ , необходимо соблюдение условий:  $2\pi W_{kv} m / \psi_k C_k < [X_k]$ ;  $2\pi W_{kv} / \psi_k < [W_{kv}]$ ;  $\sqrt{C_k / m} > 2\pi f_{k\min}$ ;  $\sqrt{C_k / m} < 2\pi f_{k\max}$  при динамическом возбуждении с постоянной амплитудой ускорения  $W_{kv}$ . Исчерпание ресурса виброизолятора происходит главным образом при его работе на резонансном режиме. Вибрационное напряжение в виброisolаторе втулочного или сегментного типа равно отношению вибрационной силы к площади сечения УДЭ  $S_k$ . Если  $t_0$  – предполагаемое время работы такого виброизолятора на резонансе, для того, чтобы напряжения в нем не превышали допускаемых, необходимо выполнение неравенства

$$2\pi W_{kv} m / \psi_k S_k < (0,65 + 3,5\bar{d}_w) \bar{\rho}^{1,7} (56,6 - 14,2(\log N) + 1,03(\log N)^2),$$

где  $N = t_0 (\sqrt{C_k / m}) / 2\pi$ . Для выполнения ограничений по ускорению при ударе  $[W_{ks}]$  и перемещению защищаемого объекта  $[X_k]$ , необходимо

$$[X_k] > \begin{cases} W_{ks} \tau_{ks} / \omega_{k0} \forall \omega_{k0} \tau_{ks} < 2; \\ 2W_{ks} / \omega_{k0}^2 \forall \omega_{k0} \tau_{ks} > 2; \end{cases} \quad [W_{ks}] > \begin{cases} W_{ks} \tau_{ks} \omega_{k0} \forall \omega_{k0} \tau_{ks} < 2; \\ 2W_{ks} \forall \omega_{k0} \tau_{ks} > 2. \end{cases}$$

Допустимое значение относительного напряжения  $[\bar{\sigma}_k]$  можно выбрать в зависимости от направления нагружения по зависимостям, полученным в разд. 4. Для выполнения этого ограничения необходимо выполнение

$$\text{неравенства } [\bar{\sigma}_k] > \begin{cases} W_{ks} \tau_{ks} \sqrt{C_k m} / S_k \sigma_{press} \forall \omega_{k0} \tau_{ks} < 2; \\ 2W_{ks} m / S_k \sigma_{press} \forall \omega_{k0} \tau_{ks} > 2. \end{cases} \quad \text{Эти неравенст-}$$

ва дают возможность выбора параметров виброизолятора при проектировании.

Полученные во втором разделе зависимости для  $\sigma_L$ ,  $\sigma_H$ ,  $G$ ,  $\tau_H$  позволили создать методику расчета втулочного виброизолятора типа ВВ (рис. 1, а) на осевое деформирование с учетом трения материала МР об элементы конструкции виброизолятора. Реакция виброизолятора в зависимости от деформации  $U$  равна

$$P_x(U) = [\sigma_{Lx}(\varepsilon_x) + \text{sign}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) \cdot \sigma_{Hx}(\varepsilon_x) - \text{sign}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) \cdot 2\sigma_{Hx}(\varepsilon_0)] \times \\ \times \exp[-5|\varepsilon_x - \varepsilon_0| / a_0(\varepsilon_0)] \cdot \pi(D^2 - d^2) / 4 + \\ + R \cdot \int_0^a \int_0^{2\pi} T(x) dx d\varphi + r \int_0^b \int_0^{2\pi} T(x) dx d\varphi,$$

где  $\varepsilon_x = U / H$  – относительная деформация,  $\varepsilon_0 = Q / H$  – относительная предварительная статическая деформация,  $D$ ,  $d$ ,  $h$  – соответственно внешний и внутренний диаметры и высота втулки,  $a$  и  $b$  – высоты внешнего и внутреннего буртиков крышки,

$T(x) = f_{mp} \cdot \text{sign}\left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right) \cdot \sigma_r \cdot (1 - e^{-5\delta(x)})$ ,  $\delta(x)$  – функция взаимного проскальзывания материала МР относительно козырьков крышки по их высоте ( $\delta = x \cdot (1 - a/h) \cdot (\varepsilon_x / a)$  на внешнем,  $\delta = x \cdot (1 - b/h) \cdot (\varepsilon_x / b)$  на внутреннем буртике крышки), радиальное напряжение внутри крышек

$\sigma_r$  рассчитывается по радиальным деформациям на наружном и внутреннем диаметре  $\varepsilon_{r2} = 2\Delta_1(D-d)$ ,  $\varepsilon_{r4} = 2\Delta_2(D-d)$ .

Разработан метод проектирования виброизоляторов с УДЭ простой формы (штулка, сегмент), подвергающимся простому нагружению (сжатие, сдвиг). Из рассмотрения колебаний виброизолятора, обеспечивающего необходимые  $f_0$  и  $\eta$  на резонансе, между точками  $\varepsilon = \varepsilon_1$  и  $\varepsilon = \varepsilon_2$  получено условие

$$(\Delta_L + s_H) / s_H < 3[W_{kv}] / \pi W_{kv}, \quad (1)$$

(где  $\Delta_L = \sigma_L(\varepsilon_1) - \sigma_L(\varepsilon_2)$ ;  $s_H = \sigma_H(\varepsilon_1) + \sigma_H(\varepsilon_2)$ ). Предлагаемый алгоритм проектирования имеет следующий вид:

1. Рассчитывается допустимая амплитуда деформации виброизолятора на резонансе  $A = [W_{kv}] / 4\pi^2 f_0^2$  и высота УДЭ  $H = A / \varepsilon_0$  ( $\varepsilon_0$  выбирается, исходя из допустимой по соображениям ресурса деформации).

2. Принимается некоторое значение  $\bar{\rho}$  (для обеспечения минимального веса виброизолятора можно начинать с наименьших технологически достижимых значений, например,  $\bar{\rho} = 0,18$ ).

3. Принимается ряд значений  $q$ , определяются минимальное и максимальное значение деформации  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ , рассчитываются  $\Delta_L$  и  $s_H$ , проверяется выполнение условия (1).

4. Если это условие выполнено, определяется  $S_k = 2\pi m W_{kv} / 3s_H$ .

5. Проверяется условие  $mg / S_k \leq \sigma_L(\varepsilon_q)$  (здесь  $\varepsilon_q = q / H$ ).

6. Если при принятом значении  $\bar{\rho}$  условие (1) не выполняется ни при каком  $q$ , значение  $\bar{\rho}$  увеличивается на 0,03 и повторяются пункты 3, 4, 5. Виброизоляторы с плотностью  $\bar{\rho} \geq 0,35$  являются чрезмерно жесткими. Поэтому если изменение значения  $\bar{\rho}$  не дало результата, требования к виброisolлятору невыполнимы.

В результате можно получить высоту  $H$  и площадь сечения  $S$  УДЭ, его плотность  $\bar{\rho}$  и необходимую предварительную деформацию  $q$ . Этого достаточно для изготовления виброизолятора. Если виброизолятор работает на сдвиг, значение  $\sigma_L$  следует заменить на  $G\gamma$ ,  $\sigma_H$  - на  $\tau_H$ , которые рассчитываются для соответствующего направления сдвига.

Виброизоляторы из материала МР, особенно в транспортных ВС, могут подвергаться воздействию случайной вибрации. Из рассмотрения линеаризованной системы с сухим трением автором получены выражения для средних ускорения и перемещения защищаемого объекта  $W \approx \pi\sqrt{A_0 p / \psi}$  и  $X \approx \pi\sqrt{A_0 / p^3 \psi}$  (где  $A_0$  - спектральная плотность случайной вибрации,  $p$  - собственная частота ВС). Для учета зависимости  $C$  и  $\psi$  от амплитуды перемещения используется итерационный процесс.

### Основные результаты и выводы

Решена важная научно-техническая проблема повышения надежности и прочности машин и аппаратуры за счет создания новых методов расчета статических, динамических и ресурсных характеристик виброизоляторов из материала МР, основывающихся на новых принципах учета нелинейности их упругих и демпфирующих свойств, оригинальном способе моделирования диссипативной силы при расчете методом конечных элементов.

1. На основании полученных закономерностей деформирования упругодемпфирующих элементов из материала МР созданы новые методы расчета статических и динамических характеристик проектируемых виброизоляторов из материала МР и пространственных ВС на их основе при гармонической и случайной нагрузке, получены рекомендации по расположению виброизоляторов и выбору их параметров.

2. С использованием известных принципов теории сопротивления усталости и особенностей систем конструкционного демпфирования доказана применимость понятия предела выносливости для расчета длительной прочности виброизоляторов из материала МР. Впервые получены кривые выносливости материала МР при различных направлениях нагружения в зависимости от относительной плотности материала и относительного диаметра проволоки, что позволяет прогнозировать ресурс виброизоляторов из материала МР.

3. На базе широких экспериментальных исследований с применением созданного автором экспериментального стенда доказано, что малые возмущающие нагрузки в поперечных по отношению к основному нагружению направлениях оказывают слабое влияние на упругодемпфирующие характеристики виброизоляторов из материала МР в основном направлении. Это позволяет использовать статические упругодемпфирующие характеристики виброизоляторов для расчета виброзащитных систем приборов и оборудования в случае их пространственного нагружения.

4. На основе экспериментально полученных для материала МР зависимостей разработан метод расчета изменения его характеристик при кратковременном значительном нагружении. Установлено, что параметрический отказ виброизолятора, за критерий чего принято изменение его жесткости, приводящее к изменению частоты более, чем на 20%, происходит при сжатии в направлении оси X при нагрузке, составляющей 36% от напряжения прессования, при растяжении – при нагрузке 10%, при сжатии в направлении оси Y – 6%, при сдвиге 1,6% от напряжения прессования. Установлено, что в данных рабочих диапазонах кратковременного нагружения относительное изменение коэффициента рассеивания энергии не превышает 5%. Это сопоставимо с регламентируемыми ТУ допусками на технологические отклонения при изготовлении виброизолятора.

5. Выполнен методологически обоснованный комплекс научно-исследовательских работ, в результате которого получены закономерности деформирования изделий из материала МР с учетом их нелинейности и анизотропии при различных видах нагрузок, что позволяет производить расчет виброизоляторов любой формы и при любых силовых воздействиях.

6. С использованием разработанных автором методов рассчитаны статические, динамические и ресурсные характеристики виброизоляторов из материала МР типов АМГ, АКП, ВВ, ВВК, ДКА, серийно выпускаемых в СГАУ для аэрокосмической промышленности и транспортного машиностроения. Во всех случаях получено совпадение с экспериментом, достаточное для практических целей. Это доказывает практическую применимость разработанных автором методов для сокращения затрат на проектирование и доводку ВС.

#### **Основное содержание диссертации опубликовано:**

**- в ведущих научных рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией:**

1. Уланов, А.М. Основы проектирования систем виброзащиты с упругими элементами из материала МР [Текст]/ А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2008. Том 10, № 3 (25). - С. 853-857.

2. Уланов, А.М. Предел выносливости материала МР в различных условиях нагружения [Текст]/ А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2008. Том 10, № 3 (25). - С. 849-852.

3. Уланов, А.М. Расчет виброизоляторов из материала МР с упругодемпфирующими элементами сложной формы методом конечных эле-

ментов [Текст]/ А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.– 2009. Том 11, № 5.- С.88-94.

4. Уланов, А.М. Учет демпфирования при расчете упругогистерезисных систем методом конечных элементов [Текст]/ А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев//Изв. вузов: Авиационная техника.- Казань, 2009, № 3.- С. 5-8.

5. Уланов, А.М. Характеристики материала МР при кратковременном значительном нагружении [Текст]/ А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев, Ф.В. Паровой // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Самара: СГАУ, 2008. Выпуск 3 (16). – С. 130-134.

6. Уланов, А.М. Воздействие случайной вибрации на нелинейную виброзащитную систему с сухим трением [Текст]/ А.М. Уланов, Ф.В. Паровой // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – Самара: СГАУ, 2008. Выпуск 3 (16). – С. 135-137.

7. Уланов, А.М. Сравнение российских и зарубежных виброизоляторов из проволочных демпфирующих материалов [Текст]/ А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. Том 11, № 3. - С. 214-218.

8. Пономарев, Ю.К. Инженерная методика расчета статических характеристик виброизоляторов с прямолинейными и кольцевыми Рабочими участками в нелинейной постановке. [Текст] / Ю.К. Пономарев, А.М. Уланов, А.С. Гвоздев, В.С.Мелентьев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2009. Специальный выпуск «Актуальные проблемы машиностроения». - С. 215-220.

**- в других изданиях:**

9. Уланов, А.М. Влияние знакопеременной нагрузки в одном направлении на характеристики материала МР в другом направлении [Текст] / А.М. Уланов // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». - Самара, 2009. Ч.1.- С. 30-31.

10. Уланов, А.М. Взаимное влияние деформации материала МР в различных направлениях [Текст]/ А.М. Уланов // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». - Самара, 2009. Ч.1. - С. 31-32.

11. Уланов, А.М. Обеспечение заданного диапазона резонансных частот линейной пространственной виброзащитной системы [Текст]/ А.М. Уланов, Г.В. Лазуткин // Междунар. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения в Поволжском регионе». - Самара, 1997. - С. 161-163.

12. Уланов, А.М. Упругие константы материала МР. [Текст]/ А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев // Наука и технологии. Том 1. Труды XXVI Российской школы. – М.: РАН, 2006. – С.81-86.

13. Уланов, А.М. Исследование характеристик упругодемпфирующих

элементов из материала МР в перпендикулярном направлении [Текст]/ А.М.Уланов, Ао Хунжуй, Цзян Хунюань, Чжан Минхуа // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». - Самара, 2003. Ч.1. – С. 258-264.

14. Пономарев, Ю.К. Методика расчета цельнометаллического втулочного виброизолятора на осевое деформирование. [Текст]/ Ю.К.Пономарев, А.М.Уланов, М.В.Медников // Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения. - Орел: ОрелГТУ, 2007. – С. 297-299.

15. Пономарев, Ю.К. Расчет виброизоляторов сложной формы из материала МР с использованием эквивалентного модуля упругости. [Текст]/ Ю.К.Пономарев, А.М.Уланов, Ф.В.Паровой //Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». - Самара, 2006. Ч.2. – С. 157-158.

16. Пономарев, Ю.К. Расчет кольцевых виброизоляторов из материала МР с помощью эквивалентного модуля упругости. [Текст]/ Ю.К. Пономарев, А.М.Уланов, Цзян Хунюань, Ся Юйхун //Новые материалы и технологии в машиностроении. - Брянск, 2003. Выпуск 2. – С. 69-73.

17. Уланов, А.М. Исследование виброизоляторов из материала МР с пружиной [Текст]/ А.М.Уланов, Ся Юйхун, Цзян Хунюань, Чжан Минхуа // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». - Самара, 2003. Ч.1. – С. 265-272.

18. Уланов, А.М. Автоматизированное проектирование виброизоляторов из материала МР [Текст]/А.М.Уланов, Г.В.Лазуткин //Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – С. 49 – 53.

19. Лазуткин, Г.В. Определение предельных возможностей виброзащитных систем с одной степенью свободы [Текст]/ Г.В.Лазуткин, Е.В.Лямин, А.М.Уланов //Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. – Куйбышев: КуАИ, 1990. – С. 80 – 88.

20. Лазуткин, Г.В. Некоторые вопросы оптимального проектирования виброзащитных систем на основе материала МР [Текст]/ Г.В.Лазуткин, Е.В.Лямин, А.М.Уланов // Труды Всесоюз. конф. «Повышение качества и надежности продукции, программного обеспечения ЭВМ и технических средств обучения». - Куйбышев, 1989. – С. 152-153.

21. Уланов, А.М. Проектирование виброзащитных систем с конструкционным демпфированием [Текст]/ А.М.Уланов, Г.В.Лазуткин// Труды Всесоюз. конф. «Проблемы виброизоляции машин и приборов». – М.- Иркутск, 1989. – С. 100.

22. Уланов, А.М. Проектирование виброзащитной системы с шестью степенями свободы, использующей виброизоляторы из материала МР

[Текст]/ А.М.Уланов, Г.В.Лазуткин// Труды Всесоюз. конф. «Механика и технология изделий из металлических и металлокерамических композиционных материалов». - Волгоград, 1989. – С. 127-129.

23. Лазуткин, Г.В. Математическое описание процессов деформирования сложных систем конструкционного демпфирования [Текст]/ Г.В.Лазуткин, А.М.Уланов // Машиноведение. 1989. № 4. - С. 39 – 43.

24. Лазуткин, Г.В. Определение динамических характеристик виброизоляторов из материала МР при многофакторном нагружении [Текст]/ Г.В.Лазуткин, А.М.Уланов, А.К.Анохин //Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. – Куйбышев: КуАИ, 1989. – С. 58 – 64.

25. Лазуткин, Г.В. Математическая модель деформирования систем с конструкционным демпфированием [Текст]/ Г.В.Лазуткин, А.М.Уланов // Всесоюз. конф. «Нелинейные колебания механических систем». - Горький, 1987. Ч.2. – С. 178-179.

26. Лазуткин, Г.В. Исследование динамических характеристик виброзащитных систем с конструкционным демпфированием [Текст]/ Г.В.Лазуткин, А.М.Уланов // Всесоюз. конф. по вибрационной технике. - Тбилиси, 1987. – С. 12.

27. Лазуткин, Г.В. Математическая модель деформирования виброизоляторов из материала МР [Текст]/ Г.В.Лазуткин, А.М.Уланов // Изв. вузов: Авиационная техника. – Казань, 1988. № 3. – С. 30-34.

28. Уланов, А.М. Исследование вибрационных процессов в системе с конструкционным демпфированием при комплексном воздействии динамической нагрузки [Текст]/ А.М.Уланов, Г.В.Лазуткин// Всесоюз. конф. по повышению надежности и долговечности машин и сооружений. - Киев, 1988. Ч.2. – С. 15-16.

29. Уланов, А.М. Исследование демпфирующих свойств материалов из металлических волокон при помощи математического моделирования [Текст]/ А.М.Уланов, Г.В.Лазуткин// Всесоюз. конф. по демпфирующим материалам. - Киров, 1988. – С. 112-114.

30. Уланов, А.М. САПР виброзащитных систем с виброизоляторами из материала МР [Текст]/ А.М.Уланов, Г.В.Лазуткин // Всесоюз. конф. по конструкционной прочности и надежности двигателей. - Куйбышев, 1988. - С.100-101.

31. Лазуткин, Г.В. Математическая модель деформирования систем конструкционного демпфирования и ее программная реализация [Текст]/ Г.В.Лазуткин, А.М.Уланов, И.В.Федорова // Проблемы прочности, 1990, № 8. – С. 30-34.

32.Лазуткин,Г.В. Разработка и исследование виброизоляторов из материала МР с повышенными упругими и демпфирующими свойствами

[Текст]/Г.В.Лазуткин, А.М.Уланов//XV конференция по вопросам рассеивания энергии при колебаниях механических систем.-Киев, 1989.-С.69-70.

33. Уланов, А.М. Применение виброизоляторов из коррозионно стойкого материала МР для вибрационной и ударной защиты оборудования [Текст]/ А.М.Уланов, Г.В.Лазуткин // IV науч.-техн. конф. «Повышение надежности и долговечности машин и сооружений».-Киев, 1991. Ч.2.-С. 4.

34. Пономарев, Ю.К. Экспериментальное исследование сетчатых упругих элементов [Текст]/ Ю.К.Пономарев, А.М.Уланов, Р.Р.Каримов// Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения. - Орел: ОрелГТУ, 2007. - С. 299-301.

35. Уланов, А.М. Исследование динамических процессов в виброзащитных системах с виброизоляторами из материала МР при помощи математического моделирования [Текст]/А.М.Уланов//XIII Всесоюз. конф. по конструкционной прочности двигателей.- Самара, 1991. - С. 78.

36. Уланов, А.М. Применение принципа Мазинга для описания процессов деформирования сложных систем конструкционного демпфирования [Текст]/ А.М.Уланов // Динамика и прочность двигателей. XXVI междунар. техн. совещание. - Самара, 1996. - С. 137-138.

37. Уланов, А.М. Сравнение различных металлических опор трубопроводов [Текст]/ А.М.Уланов, Цзян Хунюань, Янь Хуэй // Труды Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». - Самара, 2006. Ч.2. - С. 33-34.

38. Пат. RU 78540 МКИ<sup>4</sup> F16F7/14. Виброизолятор/ Белов А.С., Васюков Е.С., Волкова Т.В., Гвоздев А.С., Ермаков А.И., Мелентьев В.С., Паровой Ф.В., Пономарев Д.Ю., Пономарев Ю.К., Уланов А.М. - №2008120897/22; заявлено 26.05.08; опубл. 27.11.08. Бюл. № 33.

39. Ulanov, A.M. Description of an Arbitrary Multi-Axial Loading Process for Non-Linear Vibration Isolators [Text]/A.M.Ulanov, G.V.Lazutkin// Journal of Sound and Vibration, 1997, 203(3). - P.903-907.

40. Ulanov, A.M. Lifetime of Metal Rubber isolator with Different Vibration Amplitudes [Text]/A.M.Ulanov, Jiang Hongyuan, Ao Hongrui, Dong Chunfang, Xia Yuhong // Journal of Central South University of Technology, 2005, Vol.12, No.2. - P. 181-185.

41. Ulanov, A.M. Study on the Equivalent Elastic Modulus of Metal Rubber Isolator with Complex Structure [Text]/A.M.Ulanov, Yu.K.Ponomarev, Jiang Hongyuan, Ao Hongrui, Xia Yuhong// Journal of Hunan University of Science and Technology. 2006, vol. 23, No 3. - P. 46-49.

42. Ulanov, A.M. The effect of Low-dimensional Loading on the Dry Friction Damping Characteristics of Metal Rubber Material [Text]/ Ulanov, A.M., Jiang Hongyuan, Ao Hongrui, Xia Yuhong, Wang Shuguo. // Machinery Design & Manufacture, 2002, No 5. - P. 72-74.

43. Ulanov, A.M. Determination of elastic modulus of ring-like metal rubber isolator [Text]/A.M.Ulanov, Jiang Hongyuan, Ao Hongrui, Yan Hui, Xia Yuhong // Lubrication engineering. 2005, Vol. 12, N. 3. - P. 34 - 39.

44. Ao Hongrui. Dry Friction Damping Characteristics of a Metallic Rubber Isolator Under Two-dimensional Loading Process. [Text] /Ao Hongrui, Jiang Hongyuan, Ulanov A.M.// Modeling and Simulation in Material Science and Engineering. 2005, No 13. - P. 609-620.

45. Ao Hongrui. Estimation of the Fatigue Lifetime of Metal Rubber Isolator with Dry Friction Damping. [Text] /Ao Hongrui, Jiang Hongyuan, Ulanov A.M.//Key Engineering Materials, 2006, Vol. 326-328. - P. 949-952.

**Личный вклад:** в работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежат:

- в работах 1, 12, 13, 42, 44 - подход к описанию материала МР как квазисплошной среды, методика исследований деформации материала в различных направлениях, математическое описание результатов;
- в работах 2, 17, 40, 45 - подход к определению ресурса виброизоляторов из материала МР, получение кривых выносливости;
- в работах 3, 8, 15, 16, 41, 43 - концепция эквивалентного модуля упругости, получение уравнений деформации упругих элементов;
- в работе 4 - концепция моделирования диссипативных сил при помощи эквивалентных распределенных моментов или объемных сил, вывод уравнений для их расчета;
- в работе 5 - подход к определению прочности виброизоляторов из материала МР при кратковременном значительном нагружении;
- в работе 6 - вывод уравнений, описывающих воздействие случайной вибрации на систему с сухим трением;
- в работах 7, 34, 37 – методика и интерпретация эксперимента;
- в работах 1, 11, 18, 19, 20, 21, 30 - алгоритмы проектирования ВС;
- в работах 14, 24, 28, 38 – расчеты характеристик виброизоляторов;
- в работах 23, 25, 26, 27, 29, 31, 32, 33, 39 - модели деформирования систем конструкционного демпфирования.