

В. Н. БУЗИЦКИЙ, А. М. СОЙФЕР

ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ УПРУГО-ДЕМПФИРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

Большинство современных машин, их узлов и деталей, различные агрегаты и аппаратура в процессе эксплуатации обычно находятся под воздействием интенсивных внешних динамических нагрузок либо сами являются их источниками. Динамические, вибрационные, ударные нагрузки, как правило, вредны и требуют специальных конструктивных разработок, сводящих к минимуму результат их воздействия.

В частности, введение в систему конструкционного демпфирования, создание эффективной виброизоляции (амортизации) являются в настоящее время общепризнанным, а иногда и единственным средством обеспечения необходимой вибрационной надежности элементов конструкции.

Для демпфирования колебаний и амортизации применяется резина, особая ценность которой состоит в способности рассеивать большую энергию деформации, в высокой упругости и эластичности.

Однако резина обладает рядом существенных недостатков, ограничивающих область ее применения. В частности, она чувствительна к высоким и низким температурам, допускает сравнительно низкие удельные давления и напряжения в работе, взаимодействует с агрессивными средами и «стареет», что не позволяет применить ее в ряде наиболее ответственных узлов современных машин.

В то же время в связи с общим ростом энергонапряженности машин требования к системам демпфирования и амортизации постоянно возрастают.

Поиски материала, который обладал бы достаточной упругостью, эластичностью и демпфирующей способностью и был бы в значительной степени лишен недостатков, свойственных резине, показали, что таким требованиям может удовлетворять материал, основой строения которого является пространственная решетка

из тонкой металлической спирали, соответствующей по аналогии макромолекулам резины. Выполненный в форме специального упруго-демпфирующего элемента (шайбы, втулки, мембраны, пластины и т. д.), он может применяться в местах соединений и стыков деталей и узлов машин для демпфирования механических колебаний, а также в подвеске агрегатов, аппаратуры и механизмов для их амортизации*.

Учитывая, что созданный материал обладает рядом свойств, близких к свойствам резины, авторы условно назвали его МР («металлическая резина»).

Ниже приводятся некоторые результаты работ по изготовлению упруго-демпфирующих элементов, исследованию их механических характеристик и практическому применению в конструкциях амортизаторов и демпферов.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ДЕМПИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

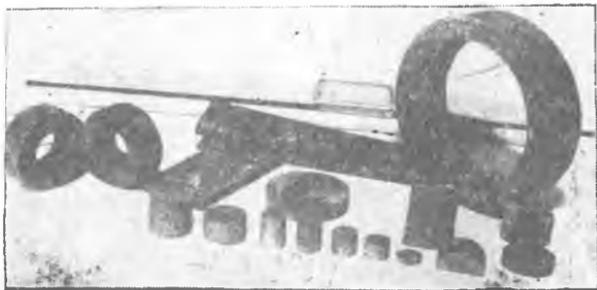
Исходным материалом для получения демпфирующих элементов является металлическая проволока различных марок, выбираемых в зависимости от условий работы демпфера (ОВС, 50ХФА, нихром, константан, ЭИ435, ЭИ708, ЭП322; IX18H9T и др.). Диаметр проволоки определяется размерами элемента, требованиями к его механическим и прочностным качествам. В большинстве практических случаев может быть использована проволока диаметром от 0,05 до 0,3 мм.

Заготовкой для получения демпфирующих элементов служит спираль из такой проволоки, плотно навиваемая обычными методами и растянутая после навивки в $7 \div 8$ раз. Диаметр спирали определяет упругие и демпфирующие свойства элемента и лежит практически в пределах от 0,2 до $1,5 \div 2$ мм.

Спираль укладывается в пресс-форму и в холодную, под давлением $100-1000 \text{ кг/см}^2$ спрессовывается в окончательный по форме

демпфирующий элемент. От того, как уложена спираль, зависят в некоторой степени прочностные свойства получаемых элементов.

На фиг. 1 показаны некоторые детали из МР.



Фиг. 1. Некоторые детали из МР.

* Авторское свидетельство № 136608 на изобретение под названием «Упругий элемент для систем демпфирования».

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МР

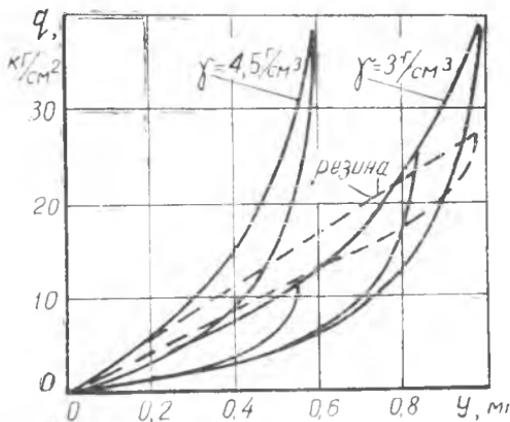
Демпфирующие элементы из МР описанной здесь модификации обладают анизотропностью и предназначены для работы при пульсирующем сжатии в значительных пределах нагрузок и в меньших пределах — при изгибе, сдвиге и растяжении.

Механическими свойствами элементов можно управлять в сравнительно широких пределах, изменяя марку проволоки, ее диаметр, диаметр спирали, давление прессования и способ укладки спирали в пресс-форму.

На фиг. 2 показаны характерные статические пульсирующие циклы сжатия образца из МР (цилиндр диаметром 20 мм) в координатах «деформация — удельная нагрузка» для различных амплитудных значений нагрузки q и двух значений плотности γ .

С возрастанием нагрузки растет число точек сжатия между витками спрессованной спирали и поэтому упругая характеристика является «жесткой». Разгрузочная ветвь цикла, также нелинейная, образует с нагрузочной ветвью петлю гистерезиса. Нагрузочная ветвь цикла данного образца — одна, каждому же амплитудному значению нагрузки соответствует своя разгрузочная ветвь, проходящая через начало координат.

Теоретически и экспериментально установлено, что статические упругие и демпфирующие свойства образцов из МР при сжатии в большой степени зависят от их плотности γ и амплитуды нагрузки q цикла. Модуль упругости, определяемый в начале сжатия, и средняя жесткость, соответствующая определенной конечной нагрузке, растут примерно пропорционально плотности. Диапазон механических характеристик может перекрывать диапазон характеристик различных марок резины. Работа рассеяния (площадь петли) линейно растет с увеличением амплитуды нагрузки и падает с увеличением плотности. В отличие от резины, работа рассеяния МР оказывается прямо пропорциональной объему образцов и не зависит от состояния их торцов. Пропитка образцов МР маслом почти не изменяет их упругих и демпфирующих характеристик. Декременты затухания колебаний δ , определяемый, как отношение работы рассеяния к удвоенной потенциальной энергии деформации, и δ_1 , определяемый по аналогии со «степенью гашения коле-



Фиг. 2. Статические циклы сжатия-разгрузки элемента.

баний» для резины, как отношение работы рассеяния к действительной работе, затраченной на деформацию, несколько уменьшаются как с увеличением плотности, так и с увеличением амплитуды нагрузки цикла и имеют тот же порядок, что и для резины (0,2—0,6).

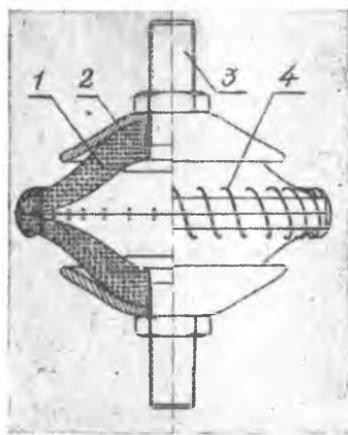
При симметричном цикле деформирования образцов (пластин, мембран и т. д.) декремент затухания δ возрастает и достигает значений 0,8—1,0. Как показал анализ циклов образцов из МР, работа рассеивания образуется непосредственно вследствие трения соприкасающихся витков, а также путем погашения потенциальной энергии деформированных витков при внезапном исчезновении контактов между ними. Этот вид рассеяния был назван срывным гистерезисом.

ПРИМЕРЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ МР

Анализ показывает, что ни один из типов отечественных амортизаторов в полной мере не удовлетворяет современным требованиям стойкости против агрессивных сред, высоких и низких температур, а также длительности хранения. Поэтому в амортизаторах оказывается возможным наиболее эффективно использовать основные преимущества элементов из МР.

На основе упруго-демпфирующих элементов из МР было разработано два типа цельнометаллических амортизаторов.

Один из этих типов — амортизатор ДК является пространственным, воспринимающим вибрационные нагрузки под любым углом к оси. Роль упруго-демпфирующих элементов выполняют два колокольчика из МР, соединенных тем или иным способом торцами (фиг. 3).



Фиг. 3. Схема амортизатора ДК:

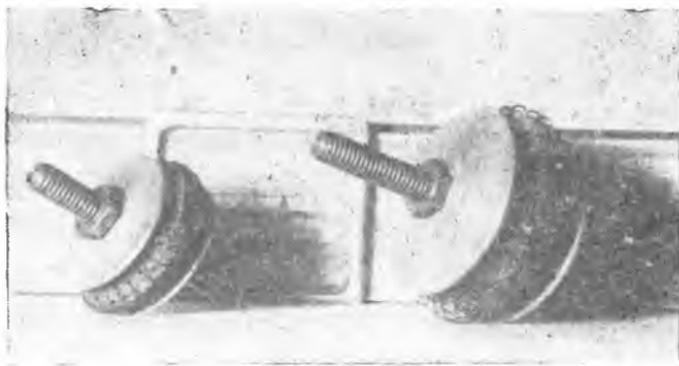
1 — колокольчики; 2 — ограничивающие шайбы; 3 — болты крепящие; 4 — проволока сшивная.

Упруго-демпфирующие свойства амортизатора зависят, помимо указанных ранее параметров, также от формы колокольчиков и от способа их соединения.

Проверено несколько способов соединения колокольчиков в амортизатор: металлическим бандажным кольцом, бандажным кольцом из силиконовой резины, бандажом-оболочкой из спирали, сшивкой проволокой по периметру. Как показывает опыт, последний способ является наилучшим (фиг. 4)

Амортизатор обладает высокими демпфирующими свойствами, обеспечивающими коэффициент усиления на резонансе, равный 3—4,5, в то время как у серийных резино-металлических амортизаторов АП («Лорд») он дости-

гает 10—15 и более, в зависимости от амплитуды возбуждения. Соединение колокольчиков стальным бандажным кольцом с ограничением по периметру снижает коэффициент усиления до 2—2,5.



Фиг. 4. Общий вид амортизатора ДК со шшивкой по периметру.

Амортизаторы ДК со шшивкой по периметру обеспечивают резонансные частоты амортизируемого объекта в пределах 10—14 *гц* в осевом направлении и 13—16 *гц* в радиальном. Для амортизаторов АП эти частоты соответственно равны 16—20 и 25—40 *гц*.

Высокие демпфирующие свойства амортизатора расширяют диапазон воспринимаемых им динамических перегрузок: амортизатор в условиях резонанса надежно работает при амплитудах вибро-смещения основания до 0,8÷1,0 *мм*. При этих же амплитудах обеспечивается отсутствие субгармонических резонансов на высоких частотах. Для большегрузных амортизаторов (7÷10 *кг* и более) этот диапазон расширяется до 2—2,5 *мм*.

Благодаря нелинейности упругой характеристики амортизатор в некоторых пределах номинальных нагрузок является равночастотным — при увеличении нагрузки вдвое резонансная частота уменьшается всего на 15—20%.

Проведенные длительные испытания амортизаторов показывают, что их характеристики практически стабилизируются после кратковременной работы на резонансе.

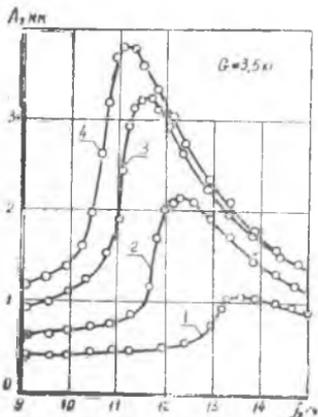
Пропитка колокольчиков силиконовой резиной улучшает прочностные свойства амортизатора; при этом жесткость возрастает на 20—40%, а коэффициент усиления на резонансе падает до значений 2—3.

Пропитка амортизатора маслом уменьшает на 10—20% коэффициент усиления и несколько снижает резонансную частоту (до 10%).

В качестве примера на фиг. 5 показан характерный вид резо-

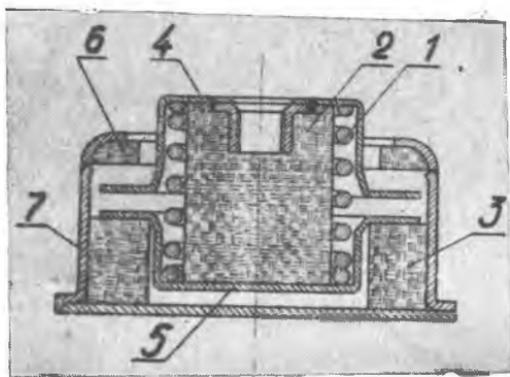
нансных кривых амортизатора «ДК» при различных амплитудах (a) вибро смещения подвеса.

Другой тип амортизатора — «АЦМ» является опорным.



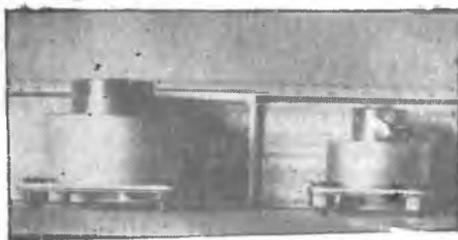
Фиг. 5. Резонансные кривые амортизатора ДК:

1 — $a = 0,3$ мм; 2 — $a = 0,5$ мм;
3 — $a = 0,7$ мм; 4 — $a = 0,8$ мм.



Фиг. 6а. Схема амортизатора АЦМ:

1 — пружина; 2 — подушка; 3 — кольцо демпфирующее; 4 — стакан крепежный; 5 — стакан опорный; 6 — ограничитель отрицательных перегрузок; 7 — корпус.



Фиг. 6б. Общий вид амортизаторов АЦМ.

В амортизаторе АЦМ демпфирующие элементы соединены последовательно, что обеспечивает более низкую резонансную частоту амортизируемого объекта (8—10 гц). Вследствие такой компоновки, а также в силу особенностей структуры демпфирующих элементов 2, 3 (тонкая металлическая спираль в отличие от столбика из плетеного металлического чулка), амортизатор АЦМ обладает более высокими демпфирующими свойствами, что исключает возможность появления субгармонических резонансов до амплитуд вибро смещения подвеса 1 мм (для амортизатора «Met-L-Flex» этот предел составляет 0,5—0,6 мм).

Резонансные кривые амортизатора имеют тот же вид, что и для амортизатора ДК.

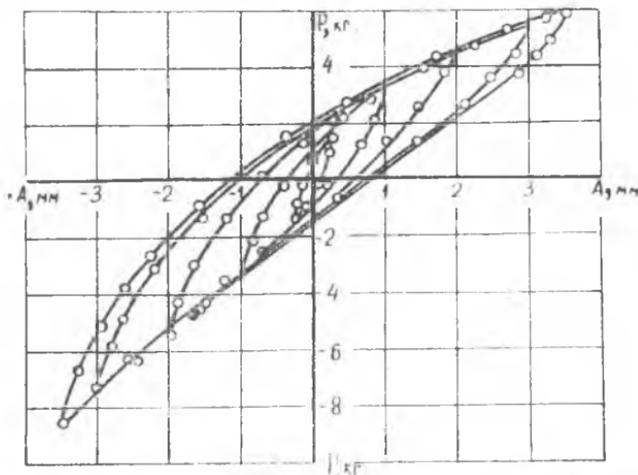
Форма резонансных кривых амортизаторов ДК и АЦМ харак-

На фиг. 6а,б показана схема амортизатора и его общий вид. Роль упругих и демпфирующих элементов выполняют: пружина 1, подушка 2 и опорное кольцо 3.

Отличия амортизатора АЦМ от сходного с ним амортизатора «Met-L-Flex», широко применяющегося в зарубежной авиационной технике, заключаются в следующем.

терна для систем с «мягкой» характеристикой упругости, что хорошо согласуется с данными статических испытаний амортизаторов.

В качестве примера на фиг. 7 показаны характерные статические циклы амортизатора ДК, соответствующие различным амплитудам деформации. Из рассмотрения циклов видно, что средняя жесткость цикла с увеличением амплитуды деформации падает, а демпфирующая способность (коэффициент рассеяния, определяемый как отношение площади петли гистерезиса к потенциальной энергии деформации) остается примерно на одном уровне. Последнее обстоятельство позволяет по статическим характеристикам довольно точно определить амплитуду вынужденных колебаний на резонансе, а по ней — резонансную частоту, пользуясь обычной линейной теорией. Точность расчета резонансного режи-



Фиг. 7. Статические циклы амортизатора ДК.

ма по статическим характеристикам при этом составляет 5–10%, что в большинстве практических случаев оказывается вполне достаточным.

Таким образом, амортизаторы ДК и АЦМ могут применяться для целей амортизации аппаратуры, агрегатов и узлов изделий, работающих в условиях агрессивных сред, высоких и низких температур при практически неограниченном сроке хранения.

Отдельные упруго-демпфирующие элементы из МР в форме шайб, колец, пластин, колокольчиков, пружин с демпфирующими подушками и т. д. могут использоваться в качестве упруго-демпфирующих связей в узлах машин для защиты их от вибрационных дефектов, в сложных пространственных системах амортизации, для виброизоляции прецизионных механизмов и в ряде других случаев. В частности, упругодемпферные зажимы для трубопроводов из МР (фиг. 8) могут при определенных условиях значительно уменьшать динамическую нагрузку от вибра-

ций в трубопроводах, а также защищать их от больших монтажных и термических напряжений, зачастую являющихся основной причиной дефектов обвязки двигателей.



Фиг. 8. Зажимы для трубопроводов.

Упомянем также о возможности снижения напряжения в тонкостенных деталях в местах резкого изменения жесткости — вблизи фланцев, ребер, вырезов, путем применения прокладок из МР.

Наиболее сложной задачей в газотурбостроении является повышение вибрационной надежности лопаток турбомашин. Од-

ним из конструктивных решений задачи может быть постановка вблизи жесткого замка лопатки упруго-демпфирующих упоров. Возможность значительного снижения вибрационных напряжений в лопатке этим методом доказана как расчетом, так и прямым экспериментом.

В заключение необходимо отметить, что в настоящее время более или менее полно исследованы элементы лишь из одной модификации МР. Применение спекания, наполнителей и армирования значительно расширит возможности использования материала МР в конструкциях машин.