

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ИЗ МР С ПРУЖИНОЙ\*

© 2002 Ся Юйхун, Цзян Хунюань, Чжан Минхуа, Уланов А.М.

Харбинский политехнический институт, г. Харбин, КНР  
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Материал МР (металлическая резина) получается холодным прессованием растянутой проволочной спирали из нержавеющей стали. Он обладает высоким коэффициентом рассеивания энергии, высокой прочностью, высокой стойкостью к воздействию окружающей среды (топливо, кислоты, пыль, радиация, солнечный свет и так далее), способен сохранять свои свойства в течение длительного срока хранения. Поэтому виброизоляторы из материала МР широко применяются в технике для различных целей.

Для различных виброзащитных систем требуются виброизоляторы с различной жесткостью и различным коэффициентом рассеивания энергии. Поэтому представляют интерес способы, позволяющие при минимальных изменениях конструкции виброизолятора изменять в широких пределах его жесткость и коэффициент рассеивания энергии. Рассмотрим их на примере виброизолятора с упругодемпфирующим элементом из материала МР, и упругим элементом в виде пружины (рис. 1).

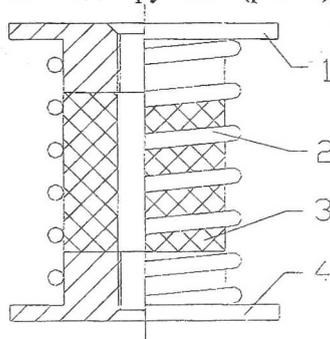


Рис. 1. Виброизолятор с упругим элементом в виде пружины.

1 - верхняя крышка; 2 - пружина; 3 - элемент из МР; 4 - нижняя крышка.

Одним из способов изменения жесткости и коэффициента рассеивания энергии является изменение плотности элемента из материала МР. С увеличением плотности увеличивается количество контактов проволок в материале МР, а также уменьшается длина участка проволоки между двумя соседними точками контакта. Для балки длины  $L$  жесткость обратно

\* Работа выполнена при поддержке Национального Научного Фонда Китая (50075017)

пропорциональна  $L^3$ , поэтому следует ожидать сильной зависимости жесткости от плотности.

В эксперименте исследовались три образца с относительной плотностью МР  $\bar{\rho} = \frac{\rho_e}{\rho_s}$  (где  $\rho_e$  - плотность элемента,  $\rho_s$  - плотность материала проволоки)  $\bar{\rho}_1 = 0.20$ ,  $\bar{\rho}_2 = 0.25$ ,  $\bar{\rho}_3 = 0.28$  (рис. 2).

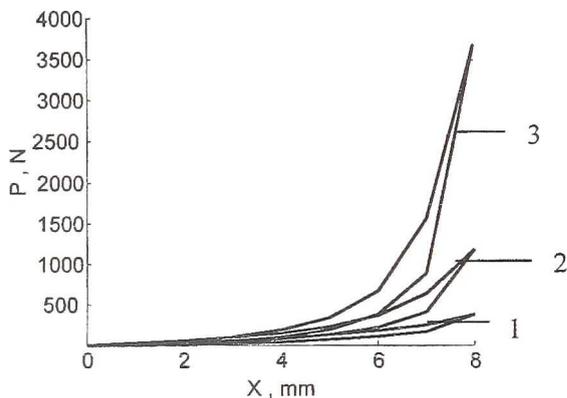


Рис. 2. Упругофрикционные характеристики виброизоляторов при различных относительных плотностях элементов из МР (жесткость пружины 10 Н/мм): 1 -  $\bar{\rho}_1 = 0.20$ ; 2 -  $\bar{\rho}_2 = 0.25$ ; 3 -  $\bar{\rho}_3 = 0.28$

При деформации 5 мм отношение жесткостей виброизоляторов близко к отношению кубов относительных плотностей, до деформации 5 мм зависимость несколько более слабая, после 5 мм – более сильная.

В результате увеличения силы в каждой точке контакта увеличивается сила трения в контакте. По этой причине, а также из-за увеличения количества точек контакта, увеличивается и коэффициент рассеивания энергии, но зависимость от плотности более слабая и ближе к линейной (при амплитуде деформации 5 мм коэффициенты поглощения равны, соответственно,  $\psi_1 = 0.75$ ,  $\psi_2 = 1.2$  и  $\psi_3 = 1.5$ ).

Увеличение коэффициента рассеивания энергии уменьшает амплитуду колебаний на резонансе, но увеличивает амплитуду колебаний в области вибрационной защиты. Поэтому в некоторых случаях требуется изменить только жесткость виброизолятора без изменения коэффициента рассеивания энергии. Для этого можно применить пружины с различной жесткостью. Такой способ также очень легок технологически, так как

стандартные пружины изготавливаются промышленностью, а технологию изготовления элементов из МР при этом менять не надо.

В эксперименте (рис. 3) исследовались виброизоляторы с пружинами различной жесткости и одним и тем же элементом из материала МР с  $\bar{\rho} = 0.20$ . При изменении жесткости пружины в широких пределах (соответственно, 10, 12 и 18 Н/мм), жесткость виброизолятора существенно изменяется при почти постоянном коэффициенте рассеивания энергии (при амплитуде деформации 5 мм  $\psi_1 = 0.75$ ,  $\psi_2 = 0.78$ ,  $\psi_3 = 0.9$ ). Небольшое изменение коэффициента рассеивания энергии связано с увеличением силы в точках контакта проволок и неизбежно при увеличении жесткости виброизолятора.

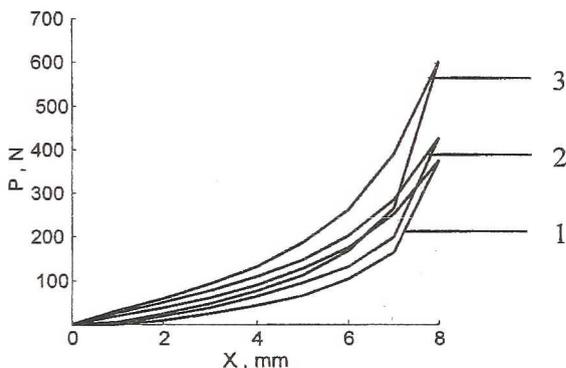


Рис. 3. Упругофрикционные характеристики виброизоляторов при различных жесткостях пружины (относительная плотность 0.20):

1 -  $K_1=18$  Н/мм; 2 -  $K_2=12$  Н/мм; 3 -  $K_3=10$  Н/мм

Другой способ увеличения жесткости виброизолятора – укладка проволочной спирали в заготовке элемента из МР не хаотически, а в определенном порядке (рис. 4).

При укладке спирали в заготовке параллельно ее оси увеличивается количество витков проволоки, работающих в направлении оси элемента из МР. При  $\bar{\rho} = 0.20$  и амплитуде деформации 5 мм жесткость виброизолятора повышается на 27 %, а коэффициент рассеивания энергии всего на 5%. Однако необходимо дальнейшее исследование того, как влияет этот способ укладки спирали на прочность виброизолятора и его способность сохранять свои свойства при продолжительной работе.

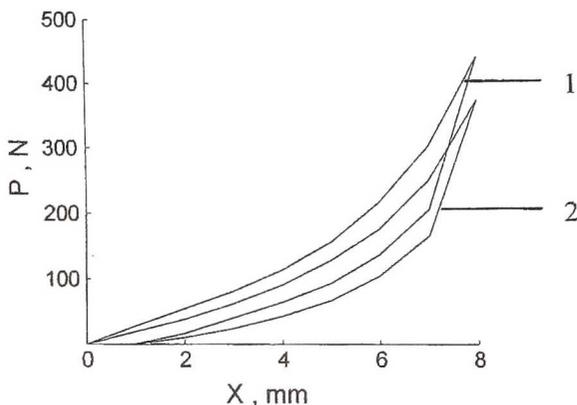


Рис. 4. Упругофрикционные характеристики виброизоляторов  
 При различных способах укладки спирали: 1- параллельно оси элемента;  
 2 – хаотически

Для описания произвольного процесса деформирования виброизолятора из МР можно использовать математическую модель его деформирования [1]. Рассмотрим получение коэффициентов математической модели для виброизолятора с односторонней петлей гистерезиса. Необходимые для построения математической модели линия центров петли  $L(x)$  и максимальная сила трения  $H(x)$  определяются, как обычно, при помощи процессов нагрузки  $P_1(x)$  и разгрузки  $P_2(x)$  при максимальной амплитуде деформации  $A_{\max}$  (рис. 5), причем используется только участок петли  $x \in [0; 0.7A_{\max}]$ , где доля проскользнувших контактов достаточно велика.

$$L(x) = \frac{P_1(x) + P_2(x)}{2}, \quad H(x) = \frac{P_1(x) - P_2(x)}{2}.$$

Но в односторонней петле от деформации  $X = 0$  идет процесс нагрузки, а не линия первоначального нагружения с линии центров, которая необходима для построения математической модели. Для получения точки на линии центров петли можно предложить процесс деформирования с постепенно уменьшающейся амплитудой деформации (например, 0 – 6 мм – 0.5 мм – 5.5 мм – 1 мм – 5 мм – 1.5 мм – 4 мм – 2 мм – 3.5 мм – 2.5 мм – 3.25 мм – 2.75 мм – 3 мм). В ходе такого процесса мы добиваемся проскальзывания во всех контактах в материале МР, и полученная в результате точка будет лежать на линии центров петли. Далее из этой точки можно

получить необходимую линию первоначального нагружения  $R(A)$  и перевести в безразмерные координаты  $R'' = \frac{R(A) - L(x)}{H(x)}$ . Далее построение произвольного процесса деформирования осуществляется по методу, изложенному в работах [1,2].

Полученные таким образом коэффициенты математической модели для виброизолятора с  $\bar{\rho} = 0.20$ , жесткостью пружины 10 Н/мм и спиралью, уложенной параллельно оси элемента, приведены в табл. 1.

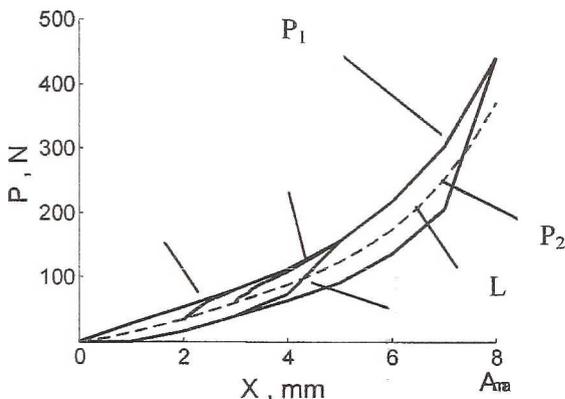


Рис. 5. Экспериментальные данные для построения и проверки математической модели деформирования виброизолятора с односторонней петлей гистерезиса

На рис. 5 приведены также процессы деформирования, полученные при помощи математической модели и хорошо совпадающие с полученными экспериментально.

Таблица 1  
Коэффициенты математической модели деформирования виброизолятора

	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$
$L(x)$	10.08	3.6	0.63	-0.36	0.04
$H(x)$	20.1	-6.22	-0.26	0.42	-0.046
$R''(x)$	3.8	-10.8	15.7	-10.3	2.4

Определив таким же образом коэффициенты математической модели для различных плотностей элементов из МР, можно получить зави-

симость этих коэффициентов от плотности. Определив коэффициенты математической модели по петле гистерезиса виброизолятора с различным временем работы, можно получить зависимость этих коэффициентов (и, соответственно, упругих и демпфирующих свойств виброизолятора) от времени его работы.

Важным свойством виброизолятора является сохранение его характеристик во время работы. Пружина разгружает элемент из материала МР и продляет время его работы. На рис. 6 и 7 показаны петли гистерезиса виброизоляторов с одинаковыми элементами из материала МР ( $\bar{\rho} = 0.20$ ) и различными пружинами (10 Н/мм и 18 Н/мм) в начале работы, через 20 минут работы виброизолятора на резонансном режиме и через 40 минут работы на резонансном режиме.

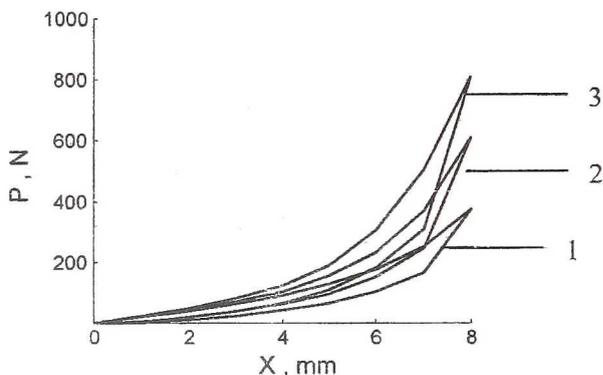


Рис. 6. Изменение упругофрикционных характеристик виброизолятора в процессе работы (жесткость пружины 10 Н/мм):

1 –  $t = 0$ ; 2 –  $t = 20$  мин; 3 –  $t = 40$  мин

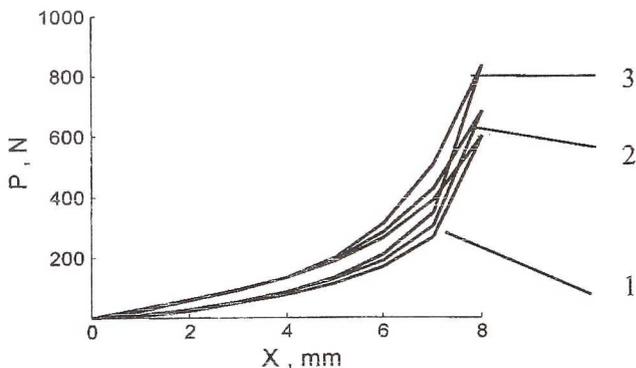


Рис. 7. Изменение упругофрикционных характеристик виброизолятора в процессе работы (жесткость пружины 18 Н/мм) (обозначения см. рис.6)

Согласно [3] во время работы материала МР происходит износ проволочек с заклиниванием некоторых точек контакта, в результате чего возрастает жесткость и уменьшается коэффициент рассеивания энергии. Однако более жесткая пружина разгружает элемент из МР и уменьшает скорость его износа.

При амплитуде деформации 5 мм жесткость виброизолятора с более жесткой пружиной изменилась всего на 7% за все время работы. У виброизолятора с более мягкой пружиной изменение жесткости составляет 22% через 20 минут работы и 48% через 40 мин. При амплитуде деформации 8 мм изменение жесткости виброизолятора с более жесткой пружиной – 13% через 20 минут работы и 38% через 40 мин., у виброизолятора с более мягкой пружиной – соответственно 63% и 116%. Значительное изменение жесткости виброизолятора во время работы приводит к изменению его резонансной частоты и диапазона, в котором обеспечивается защита от вибрации, и поэтому является недопустимым.

Коэффициент рассеивания энергии для виброизолятора с более жесткой пружиной во всем диапазоне амплитуд уменьшается за время работы в пределах 10...17%, что можно считать вполне допустимым. На рисунке 8 приведены полученные в результате динамического эксперимента зависимости коэффициента передачи от частоты при различном времени работы виброизолятора. Видно, что их изменение незначительно.

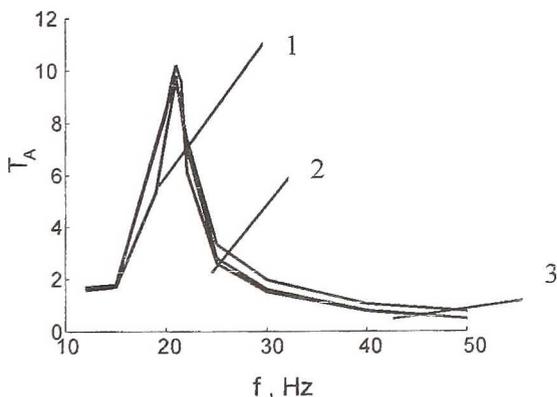


Рис. 8. Изменение амплитудно-частотных характеристик виброизолятора в процессе работы на режиме резонанса (жесткость пружины 18 Н/мм) (обозначения как на рис. 6)

Виброизолятор с более мягкой пружиной разгружен недостаточно. Из рис. 9 видно, что через 20 мин. работы значения коэффициента передачи существенно увеличиваются, особенно в той области, где виброизолятор должен обеспечивать защиту от вибрации. Соответственно,

существенно уменьшилась эффективность защиты от вибрации. Диапазон вибрационной защиты в начале работы виброизолятора начинался с 34 Гц, через 20 мин. работы на резонансе он начинается с 49 Гц. Это означает значительное уменьшение коэффициента рассеивания энергии.

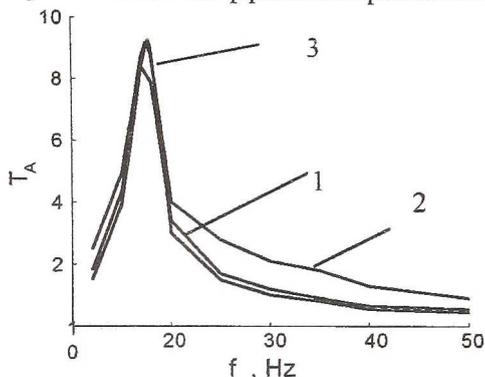


Рис. 9. Изменение амплитудно-частотных характеристик виброизолятора в процессе работы на режиме резонанса (жесткость пружины 10 Н/мм, обозначения как на рис. 6)

Через 40 мин. работы на резонансе коэффициент передачи виброизолятора с более мягкой пружиной почти возвращается к прежнему значению. Но это вызвано ростом коэффициента рассеивания энергии из-за критического износа проволок МР, и при дальнейшей работе следует ожидать разрушения проволок в ближайшее время.

Собственная жесткость элемента из МР с  $\bar{\rho} = 0,20$  в рабочем диапазоне амплитуд (0...4 мм) изменяется от 8,7 до 12 Н/мм. Можно сделать вывод, что пружина с жесткостью, приблизительно равной жесткости элемента из МР (10 Н/мм), разгружает его недостаточно и необходима пружина, жесткость которой в 1,5...2 раза больше жесткости элемента (18 Н/мм).

#### Список литературы

1. Ulanov A.M., Lazutkin G.V. Description of an Arbitrary Multi-axial Loading Process for Non-linear Vibration Isolators//Journal of Sound and Vibration, 1997, 203(3), 903-907.
2. Jiang Hongyuan, Ao Hongrui, Xia Yuhong, Ulanov A.M. Experimental Research on Characteristics of Metal Rubber Element//China Mechanical Engineering, 2001, Vol.12, N 11, 1294-1297.
3. Чегодаев Д.Е., Мулюкин О.П., Колтыгин Е.В. Конструирование рабочих органов и оборудования из упругопористого материала МР. Часть 2. Самара, СГАУ, 1994.