

УДК 629.7.06

**РЕСУРС ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ИЗ МАТЕРИАЛА МР
ПРИ ДЕЙСТВИИ СЛУЧАЙНОЙ НАГРУЗКИ**© 2014 А. М. Уланов¹, С. А. Безбородов²¹Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)²ОАО «Кузнецов», г. Самара

Исследован ресурс виброизоляторов из проволочного материала МР, широко применяющихся в транспорте, при действии случайной нагрузки. Получены зависимости ресурса от динамического и статического напряжения, параметров материала МР (относительной плотности, диаметра проволоки). Исследован характер изменения параметров виброизолятора в течение ресурса. Получено уравнение для расчёта ресурса, необходимое при проектировании виброзащитных систем с виброизоляторами из МР.

Ресурс, случайная нагрузка, виброизолятор, материал МР, напряжение.

Материал МР («Металлическая резина») производится при помощи холодного прессования хаотически уложенной проволочной спирали из нержавеющей стали. Он имеет высокую прочность, большой коэффициент рассеивания энергии, стоек к воздействию агрессивной среды, высоких и низких температур, и свойства материала не изменяются со временем хранения. Виброизоляторы с упругодемпфирующими элементами из материала МР широко применяются в наземной, воздушной и космической технике. Нагрузка на виброзащитные системы часто имеет случайный характер. Таким образом, при проектировании виброзащитных систем с виброизоляторами из материала МР необходимо знать ресурс этих виброизоляторов при действии случайной нагрузки. Однако до настоящего времени этот вопрос не был изучен и существуют только исследования ресурса виброизоляторов из материала МР при действии гармонической вибрации [1]. В этих исследованиях МР рассматривается как анизотропный квазисплошной мате-

риал, и для расчёта его ресурса используются те же параметры, как и для обычных конструкционных материалов: пределы выносливости при нормальных и касательных напряжениях, соответственно σ_{-1} и τ_{-1} [1]. В настоящем исследовании применён тот же подход для изучения ресурса материала МР при действии случайной нагрузки.

Для исследования ресурса виброизоляторов из материала МР применялись втулочные виброизоляторы (рис. 1).

Внешний диаметр втулок $D_1 = 16$ мм, внутренний $D_2 = 6,5$ мм, высота втулок в свободном состоянии от $H = 4,7$ мм до $5,3$ мм, высота втулок в виброизоляторе $H_1 = 4,4$ мм. Нагрузка прикладывалась в направлении прессования материала МР (в этом направлении материал МР работает в виброизоляторах в большинстве случаев). Диапазон частот случайной нагрузки изменялся от $[5 \dots 200]$ Гц до $[5 \dots 2000]$ Гц.

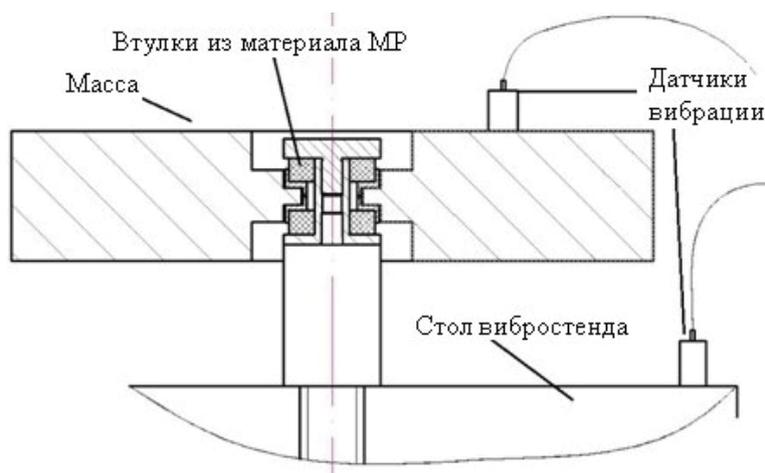


Рис. 1. Нагрузка втулочного виброизолятора при исследовании ресурса

Характеристики материала МР зависят от его относительной плотности

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_{MR}}{\rho_s} \quad (\rho_{MR} - \text{плотность материала МР,}$$

ρ_s - плотность стали), диаметра проволоки d_w и предварительной статической относительной деформации $\varepsilon_Q = \frac{Q}{H}$

($Q = H - H_1$ - абсолютная статическая деформация).

Диапазон исследованных параметров материала МР: $\bar{\rho} \in [0,2...0,289]$, $d_w \in [0,1...0,2]$ мм, $\varepsilon_Q \in [0,06...0,17]$. Масса нагрузки $m = 2,08$ кг.

В эксперименте периодически проверялись резонансная частота f_0 и коэф-

фициент усиления на резонансе $\eta_0 = \frac{a_{\sin}}{A_{\sin}}$

(A_{\sin} и a_{\sin} - соответственно амплитуды входного и выходного ускорения) при гармоническом вибрационном нагружении. Если один из этих параметров отклонялся более чем на 20 % от первоначального значения, то виброизолятор считался неработоспособным. Амплитуда входного гармонического виброускорения $A_{\sin} = 10...30$ м/с².

Процесс износа значительно зависит от диаметра проволоки. На рис. 2 показаны втулки, параметры которых вышли за пределы 20 % ограничения.



Рис. 2. Втулки с различным диаметром проволоки после износа.
Слева - $d_w = 0,2$ мм, в середине - $d_w = 0,15$ мм, справа - $d_w = 0,1$ мм

Левая втулка из проволоки $d_w = 0,2$ мм полностью изношена. Средняя втулка из проволоки $d_w = 0,15$ мм содержит много сломанных кусков проволоки и чёрной пыли от изношенной проволоки. Правая втулка из проволоки $d_w = 0,1$ мм несколько спрессована и содержит очень мало пыли. Её параметры лежат вне 20% ограничения, но если ограничение будет менее жёстким, то она способна работать до физического, а не параметрического износа, т.е. по меньшей мере вдвое более долгий срок. Можно объяснить это различие тем, что при одинаковой плотности материал МР с меньшим диаметром проволоки имеет больше точек контакта проволок. Проволоки малого диаметра также более гибкие. Проволоки большего диаметра негибки, напряжение в немногих контактных точках существенно больше и проволоки быстрее перерезают друг друга.

Обычно износ ведёт к уменьшению резонансной частоты. Проволоки перерезают друг друга и жёсткость виброизолятора уменьшается. Коэффициент усиления на резонансе изменяется незначительно для малого диаметра проволоки ($d_w = 0,1$ мм), малой статической деформации ($\varepsilon_Q = 0,06$) и малой относительной плотности ($\bar{\rho} = 0,2$). Для большого диаметра проволоки ($d_w = 0,15 \dots 0,2$ мм) коэффициент усиления на резонансе также значительно уменьшается. Для большой статической деформации ($\varepsilon_Q = 0,12 \dots 0,17$) коэффициент усиления на резонансе значительно увеличивается. Для большой относительной плотности ($\bar{\rho} = 0,289$) резонансная частота в течение ресурса практически стабильна. Однако коэффициент усиления на резонансе значительно увеличивается и виброизолятор считается неработоспособным именно по выходу за пределы 20 % ограничения по коэффициенту усиления. Если относительная плотность меньше ($\bar{\rho} = 0,236$), то этот эффект также уменьшается (резонансная частота во время ресурса уменьшается, коэффи-

циент усиления на резонансе несколько увеличивается). Это означает, что при различных параметрах материала МР механизмы его износа существенно отличаются.

В качестве параметра нагрузки применялось среднее напряжение. Преимущество этого параметра заключается в том, что он включает нагрузку от случайной вибрации (её спектральную плотность A), массовую нагрузку и учитывает размер виброизолятора. Известно выражение для среднего ускорения при случайной нагрузке [2]:

$$a = \sqrt{\frac{\pi A f_0 \eta_0}{2}}. \quad (1)$$

В таком случае среднее значение динамического напряжения

$$\sigma_A = \frac{ma}{S} = \frac{m}{S} \sqrt{\frac{\pi A f_0 \eta_0}{2}}, \quad (2)$$

где S – площадь минимального сечения упругодемпфирующего элемента из материала МР в направлении, перпендикулярном направлению действия нагрузки.

Статическое напряжение в виброизоляторе от статической деформации ε_Q [3]

$$\sigma_Q \approx (0,61 + 1,77\varepsilon_Q - 20,4\varepsilon_Q^2 + 160\varepsilon_Q^3)\varepsilon_Q \times \left(\frac{\bar{\rho}}{0,18}\right)^{1,7} (-47,1d_w^2 + 16,5d_w - 0,174). \quad (3)$$

Суммарное среднее напряжение

$$\sigma = \sigma_A + \sigma_Q. \quad (4)$$

Ресурс виброизолятора зависит от среднего значения его деформации x , которое связано со средним значением случайного ускорения a :

$$x = \frac{a}{4\pi^2 f_0^2}. \quad (5)$$

Таким образом, динамическое напряжение учитывает также и деформацию виброизолятора.

Зависимость ресурса от частотного диапазона случайной нагрузки в проведённом исследовании не обнаружена.

Результаты эксперимента приведены на рис. 3 – 5 (ресурс указан в минутах).

Уравнения, связывающие ресурс и суммарное среднее напряжение при различном диаметре проволоки, имеют вид:

$$\sigma = 0,68 - 0,13 \lg T \text{ (для } d_w = 0,1 \text{ мм),}$$

$$\sigma = 0,93 - 0,17 \lg T \text{ (для } d_w = 0,15 \text{ мм),}$$

$$\sigma = 1,18 - 0,19 \lg T \text{ (для } d_w = 0,2 \text{ мм).}$$

Чтобы получить единое уравнение, разделим коэффициенты второго и третьего из этих уравнений на соответствующие коэффициенты первого (базового) уравнения. Зависимость первого относительного коэффициента α_1 и второго α_2 от d_w можно описать выражениями:

$$\alpha_1(d_w) = 0,26 + 7,4d_w, \tag{6}$$

$$\alpha_2(d_w) = 0,39 + 6,1d_w. \tag{7}$$

Таким образом, единое уравнение, связывающее ресурс, суммарное среднее напряжение и диаметр проволоки, имеет вид:

$$\sigma = 0,68 \alpha_1(d_w) - 0,13 \alpha_2(d_w) \lg T.$$

Уравнения, связывающие ресурс и суммарное среднее напряжение при различной статической деформации, имеют вид:

$$\sigma = 0,68 - 0,13 \lg T \text{ (для } \varepsilon_Q = 0,06),$$

$$\sigma = 0,82 - 0,15 \lg T \text{ (для } \varepsilon_Q = 0,12),$$

$$\sigma = 0,95 - 0,17 \lg T \text{ (for } \varepsilon_Q = 0,17).$$

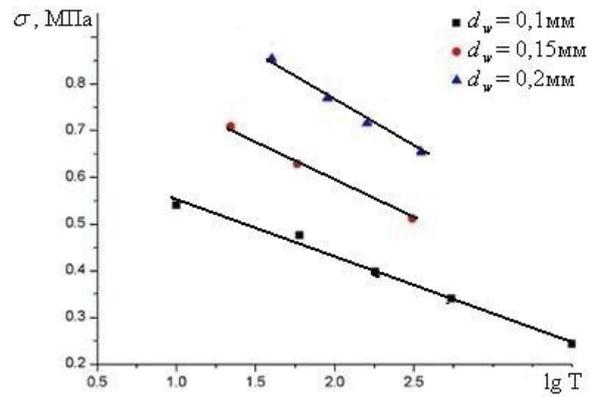


Рис. 3. Зависимость ресурса в минутах от суммарного среднего напряжения и диаметра проволоки $\bar{\rho} = 0,2, \varepsilon_Q = 0,06$

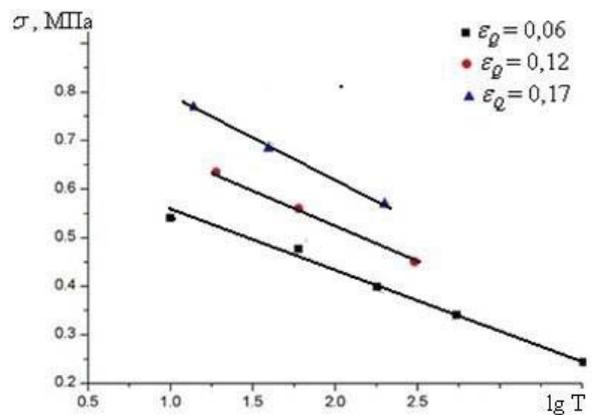


Рис. 4. Зависимость ресурса в минутах от суммарного среднего напряжения и статической деформации: $\bar{\rho} = 0,2, d_w = 0,1 \text{ мм}$

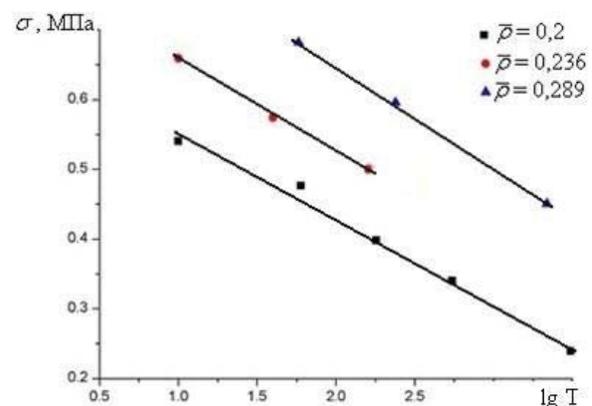


Рис. 5. Зависимость ресурса в минутах от суммарного среднего напряжения и относительной плотности: $d_w = 0,1 \text{ мм}, \varepsilon_Q = 0,06$

Найдём относительные коэффициенты α_3 и α_4 и получим их зависимости от ε_Q :

$$\alpha_3(\varepsilon_Q) = 0,78 + 3,64\varepsilon_Q, \quad (8)$$

$$\alpha_4(\varepsilon_Q) = 0,84 + 2,72\varepsilon_Q. \quad (9)$$

Таким образом, единое уравнение, связывающее ресурс, суммарное среднее напряжение и статическую деформацию, имеет вид:

$$\sigma = 0,68 \alpha_3(\varepsilon_Q) - 0,13 \alpha_4(\varepsilon_Q) \lg T.$$

Уравнения, связывающие ресурс и суммарное среднее напряжение при различной относительной плотности имеют вид:

$$\sigma = 0,68 - 0,13 \lg T \text{ (для } \bar{\rho} = 0,2),$$

$$\sigma = 0,79 - 0,135 \lg T \text{ (для } \bar{\rho} = 0,236),$$

$$\sigma = 0,98 - 0,145 \lg T \text{ (для } \bar{\rho} = 0,289).$$

Найдём относительные коэффициенты α_5 и α_6 и получим их зависимости от $\bar{\rho}$:

$$\alpha_5(\bar{\rho}) = 5\bar{\rho}, \quad (10)$$

$$\alpha_6(\bar{\rho}) = 0,75 + 1,24\bar{\rho}. \quad (11)$$

Таким образом, единое уравнение, связывающее ресурс, суммарное среднее напряжение и относительную плотность, имеет вид:

$$\sigma = 0,68 \alpha_5(\bar{\rho}) - 0,13 \alpha_6(\bar{\rho}) \lg T.$$

Общее уравнение, связывающее ресурс, суммарное среднее напряжение, диаметр проволоки, статическую деформацию и относительную плотность, имеет вид:

$$\sigma = 0,68 \alpha_1(d_w) \alpha_3(\varepsilon_Q) \alpha_5(\bar{\rho}) - 0,13 \alpha_2(d_w) \alpha_4(\varepsilon_Q) \alpha_6(\bar{\rho}) \lg T.$$

Получим уравнение для расчёта ресурса виброизоляторов из МР при случайной нагрузке:

$$T = 10^{\frac{0,68 \alpha_1(d_w) \alpha_3(\varepsilon_Q) \alpha_5(\bar{\rho}) - \sigma}{0,13 \alpha_2(d_w) \alpha_4(\varepsilon_Q) \alpha_6(\bar{\rho})}}, \quad (12)$$

где суммарное среднее напряжение определяется из уравнений (2) – (4), а коэффициенты – из уравнений (6) – (11).

Для проверки применимости этого уравнения при одновременном изменении всех четырёх параметров, от которых зависит ресурс, был проведён эксперимент с виброизолятором при $d_w = 0,15$ мм, $\varepsilon_Q = 0,17$, $\bar{\rho} = 0,289$. Статическое напряжение $\sigma_Q = 0,41$ МПа, среднее значение динамического напряжения $\sigma_A = 0,79$ МПа, среднее суммарное напряжение $\sigma = 1,2$ МПа. Рассчитанное значение ресурса составило 635 минут, полученное в эксперименте – 700 минут. Погрешность составляет менее 10 %, из чего можно сделать вывод о практической пригодности уравнения (12) для расчёта ресурса.

Зависимости ресурса от напряжения приблизительно линейны в диапазоне значений, используемых в эксперименте. Однако невозможно, чтобы эти линии пересекали оси координат (это означало бы отрицательное напряжение или ресурс). Следовательно вне диапазона проведённого эксперимента эти зависимости имеют нелинейные части, приближающиеся к осям координат. Левая нелинейная часть малоинтересна для практики, так как соответствует ресурсу менее 10 минут. Правая часть требует длительного эксперимента (более 2000 минут) и дальнейшего исследования.

Библиографический список

1. Уланов А.М., Пономарев Ю.К. Предел выносливости материала МР в различных условиях нагружения // Изв. Самар. научн. центра РАН, 2008. Т. 10, №3. С. 849-852.
2. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.
3. Уланов А.М., Пономарев Ю.К. Основы проектирования систем виброзащиты с упругими элементами из материала МР // Изв. Самар. науч. центра РАН, 2008. Т. 10, № 3. С. 853-857.

Информация об авторах

Уланов Александр Михайлович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: alexulanov@mail.ru. Область научных ин-

тересов: защита от вибрации и удара при помощи систем сухого трения.

Безбородов Сергей Александрович, инженер-конструктор, отдел прочности и теплофизики, ОАО «Кузнецов», г. Самара. E-mail: bezborodovser@yandex.ru. Область научных интересов: защита трубопроводов от удара и вибрации.

LIFE TIME OF VIBRATION ISOLATORS MADE OF MR MATERIAL SUBJECTED TO RANDOM LOADS

© 2014 A. M. Ulanov¹, S. A. Bezborodov²

¹Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

²Open joint-stock company “Kuznetsov”, Samara, Russian Federation

A lifetime of vibration isolators made of wire MR material widely used in transport systems under random loads is analyzed. Dependencies of lifetime on dynamic and static stress, parameters of MR material (relative density, wire diameter) are obtained. The character of changes in vibration isolator parameters during its lifetime is analyzed. An equation for calculating the lifetime required for the design of vibration isolation systems with vibration isolators made of MR material is obtained.

Lifetime, random load, vibration isolator, MR material, stress.

References

1. Ulanov A.M., Ponomarev Yu.K. The fatigue limit of MR material for different load conditions // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. 2008. V. 10, no. 3. P. 849-852. (In Russ.)
2. Biderman V.L. Teoriya mekhanicheskikh kolebaniy [Theory of mechanical vibration] Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1980. 480 p.
3. Ulanov A.M., Ponomarev Yu.K. Design of vibration protection systems with elastic elements made of MR material // Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk. 2008. V. 10, no. 3. P. 853-857. (In Russ.)

About the authors

Ulanov Alexander Mikhailovich,
Doctor of Science (Engineering), Associate
Professor, Professor of the Aircraft Design
Department, Samara State Aerospace Uni-
versity. E-mail: alexulanov@mail.ru. Area of
research: protection against vibration and
shock by dry friction systems.

Bezborodov Sergey Alexandrovich,
Design Engineer, Open Joint-Stock Company
“Kuznetsov”, Strength and Thermal Physics
Department. E-mail: [bez-
borodovser@yandex.ru](mailto:bezborodovser@yandex.ru). Area of research:
protection of pipelines against vibration and
shock.