

ПРЕДЕЛ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛА МР В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

© 2008 А.М. Уланов, Ю.К. Пономарев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Проволочный материал МР (металлическая резина) широко используется для защиты оборудования от вибрации и удара. Представлены результаты исследования предела усталости материала МР при различных направлениях нагружения, получены кривые усталости. Исследовано влияние параметров материала и смазки на предел усталости. Предложен метод расчета ресурса виброизоляторов из МР в зависимости от нагрузки, относительной плотности материала и диаметра проволоки.

Виброизоляторы из материала МР, получаемого холодным прессованием хаотически уложенной стальной проволочной спирали, широко используются для защиты от вибрации и удара различного оборудования. Однако информации о ресурсе материала МР очень мало. В [1] приводятся кривые усталости только для виброизоляторов определенного типа (ДК и ДКУ), и в зависимости от абсолютного параметра (амплитуды деформации), что исключает возможность использования этих кривых для других виброизоляторов. Предлагается применить для оценки ресурса виброизоляторов из МР используемые для обычных материалов пределы усталости на сжатие σ_{-1} и на сдвиг τ_{-1} .

Для исследования работы материала МР были использованы виброизоляторы с упругодемпфирующими элементами втулочного типа (рис. 1), которые просты в изготовлении и широко используются. Исследуемые втулки имели внешний диаметр $D=44$ мм, внутренний диаметр $d=24$ мм, свободный размер после прессования $H=20$ мм, различную от-

носительную плотность $\bar{\rho}$ ($\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_s}$, где ρ – плотность втулок, ρ_s – плотность стали), и были изготовлены из проволоки с различным относительным диаметром \bar{d}_w ($\bar{d}_w = \frac{d_w}{d_s}$, где d_w – диаметр проволоки, d_s – диаметр проволочной спирали).

В качестве параметров контроля износа использовались изменение резонансной частоты или коэффициента передачи виброизолятора на резонансе при амплитуде входного ускорения $20m/c^2$. При отклонении хотя бы одного из этих параметров более, чем на 20% от первоначального значения, виброизолятор считался неработоспособным.

Эксперименты проводились при массовой нагрузке $m=7,5$ кг на виброизолятор на частоте 30 Гц. Амплитудное вибрационное напряжение на виброизолятор рассчитыва-

лось по формуле $\sigma_a = \frac{4mw}{\pi(D^2 - d^2)}$, где w – измеряемое ускорение на установленной на виброизолятор массе.

Материал МР в виброизоляторах обычно имеет предварительное сжатие при сборке виброизолятора q . В экспериментах применялась относительная деформация предвари-

тельного сжатия $\varepsilon_q = \frac{q}{H} = 0,1 \dots 0,25$. Напряжение от этого сжатия σ_q эквивалентно среднему напряжению нагрузочного цикла σ_m в общеизвестной формуле для расчета запаса

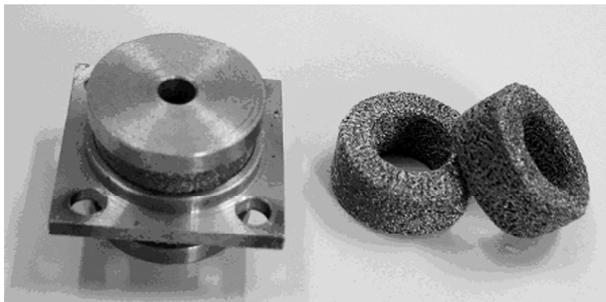


Рис. 1. Втулочный виброизолятор

прочности при циклическом нагружении

$$K = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a + \psi_\sigma \sigma_m} \quad (1)$$

Для определения коэффициента ψ_σ обычно используются диаграммы Серенсена-Кинасошвили, Гудмана или Рабиновича [2]. Для построения диаграмм Серенсена-Кинасошвили и Рабиновича используется предел текучести материала. Материал МР имеет пластические деформации даже при очень малых приложенных нагрузках, поэтому понятие предела текучести к нему неприменимо. Поэтому для МР целесообразно принять определение ψ_σ по Гудману:

$$\psi_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \quad (2)$$

где σ_B – предел прочности материала. В таком случае коэффициент ψ_σ не зависит от соотношения σ_a и σ_q , и может быть найден из простого эксперимента. Если два виброизолятора с параметрами цикла σ_{a1} , σ_{q1} и σ_{a2} , σ_{q2} соответственно, имеют одинаковый ресурс, можно найти ψ_σ из уравнения $\sigma_{a1} + \psi_\sigma \sigma_{q1} = \sigma_{a2} + \psi_\sigma \sigma_{q2}$. Если подставить в это уравнение экспериментальные данные по нагрузкам, получим

$$\psi_\sigma \approx 0,4 \quad (3)$$

Получаемое из (2) и (3) соотношение $\sigma_{-1} \approx 0,4\sigma_B$ согласуется с известным для многих конструкционных материалов [2].

На рис. 2 в качестве примера приведена кривая усталости для материала МР, работающего на сжатие в направлении прессования, полученная для виброизоляторов со следующими параметрами $\bar{\rho} = 0,2$, $\bar{d}_w = 0,1$. Принято значение $\psi_\sigma = 0,4$. Кривую можно аппроксимировать полиномиальной зависимостью от числа циклов нагружения N вида $3.67 - 0.924(\log N) + 0.067(\log N)^2$. Точки, не лежащие на кривой усталости, показывают изменение значения предела усталости для измененных параметров эксперимента.

Характер износа материала МР в разных местах кривой усталости существенно отличается. При больших напряжениях, ведущих к быстрому разрушению виброизолятора ($N < 100000$ циклов) продукты износа состо-

ят из кусков проволоки. При меньших напряжениях, допускающих длительную работу виброизолятора ($N > 1000000$ циклов) продукты износа состоят только из тонкого порошка окалины.

Однако и в том, и в другом случае материал МР в ходе работы спрессовывается, и одна из втулок виброизолятора при исчерпании его ресурса имеет размер 18...18,5 мм вместо исходных 20 мм.

Влияние относительной плотности материала МР на значение предела усталости можно оценить по точкам E ($\bar{\rho} = 0,24$) и F ($\bar{\rho} = 0,28$) (рис. 2). Установлено, что увеличение σ_{-1} пропорционально увеличению $\bar{\rho}$ в степени 1,7. Точно так же зависят от $\bar{\rho}$ давление прессования и жесткость материала МР в направлении прессования [4].

Влияние относительного диаметра проволоки материала МР на значение предела усталости можно оценить по точкам J ($\bar{d}_w = 0,15$) и K ($\bar{d}_w = 0,2$) (рис. 2). Установлено, что оно не пропорционально \bar{d}_w . Это можно объяснить тем, что при увеличении диаметра проволоки увеличивается поперечное сечение отдельной проволоки, но, с другой стороны (при постоянном значении “тр”), уменьшается количество контактов в единице объема и увеличивается давление в отдельном контакте. В

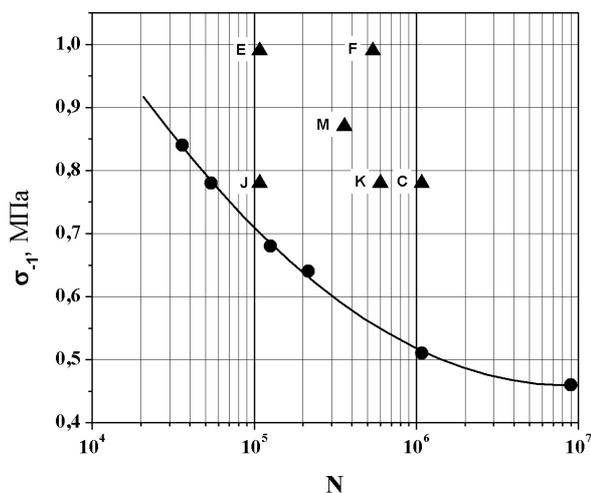


Рис. 2. Кривая усталости материала МР при $\bar{\rho} = 0,2$, $\bar{d}_w = 0,1$ и влияние параметров эксперимента на значение предела усталости

исследованном диапазоне ($\bar{d}_w = 0,1 \dots 0,2$) зависимость σ_{-1} от \bar{d}_w можно приблизительно описать зависимостью вида $0,65 + 3,5\bar{d}_w$. Окончательно, с учетом N , $\bar{\rho}$ и \bar{d}_w ,

$$\sigma_{-1} = (0,65 + 3,5\bar{d}_w) \left(\frac{\bar{\rho}}{0,2} \right)^{1,7} (3,67 - 0,924(\log N) + 0,067(\log N)^2) \quad (4)$$

Поскольку причиной износа материала МР является трение проволок, на ресурс существенно влияет смазка контактных поверхностей. При использовании твердой смазки MoS_2 (твердая смазка вводится в виде порошка перед прессованием втулок, ее вес составлял 1,2 % веса втулки), передаточное отношение на резонансе несколько увеличивается (около 20 %). Однако предел усталости существенно вырастает (рис. 2, точка М). Аналогичные результаты дает твердая смазка в виде графита (рис. 2, точка С).

Кривая усталости материала МР на сдвиг для виброизоляторов с $\bar{\rho} = 0,2$ и $\bar{d}_w = 0,1$ приведена на рис. 3 (кривая 3). Видно, что предел усталости на сдвиг приблизительно вдвое меньше предела усталости на сжатие в направлении прессования, что также согласуется с данными для многих обычных материалов [2].

Для исследования работы материала МР в направлении, перпендикулярном направлению прессования, были использованы сегменты в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами 10x20x14 мм. Шесть таких сег-

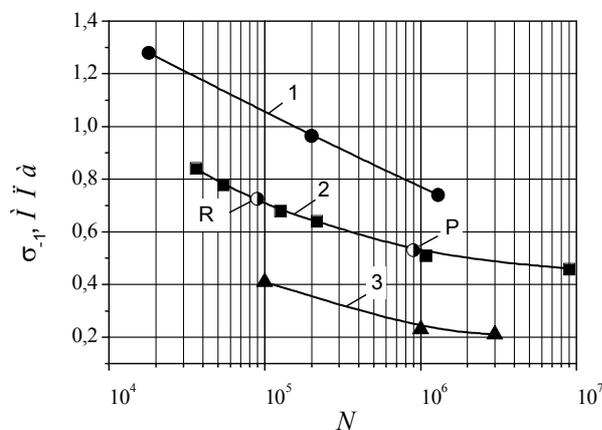


Рис. 3. Кривые усталости материала МР для различных условий нагружения: 1 – в направлении, перпендикулярном силе прессования, 2 – в направлении силы прессования, 3 – сдвиг. Точки R и P – кольцевой виброизолятор

ментов устанавливались по окружности вместо одной втулки, размер в направлении оси прессования $B=10$ мм оказывался при этом радиальным, в направлении размера $H=20$ мм осуществлялась деформация при вибрации (вдоль оси виброизолятора), размер $L=14$ мм – по окружности. Амплитудное вибрационное напряжение на виброизолятор рассчитывалось

по формуле $\sigma_a = \frac{mw}{6BL}$. Кривая усталости для сжатия, полученная с учетом (3) для виброизоляторов с $\bar{\rho} = 0,2$ и $\bar{d}_w = 0,1$, также приведена на рис. 3. Предварительное сжатие виброизоляторов принималось в пределах $\epsilon_q = 0,0125 \dots 0,05$. Показано (сравнить кривые 1 и 2 на рис.3), что в направлении, перпендикулярном силе прессования, σ_{-1} больше, чем в направлении прессования, но в этом направлении также выше и жесткость материала МР [4].

Поскольку полученные кривые усталости относятся к материалу МР, они должны быть пригодны для расчета ресурса любого виброизолятора из данного материала. Для проверки был выбран один из виброизоляторов кольцевого типа (рис. 4).

Исследовались кольца с внешним диаметром 22 мм и внутренним диаметром 16 мм, шириной 7 мм, из стальной проволоки диаметром 0,1 мм ($\bar{d}_w = 0,1$ мм), с относительной плотностью $\bar{\rho} = 0,2$. Массовая нагрузка на кольцо составляла 229 г. Эквивалентный модуль упругости для расчета кольца определялся по методу [3] и составлял 8 МПа. Амплитуде деформации кольца 3 мм соответствует рассчитанное при помощи программы ANSYS максимальное эквивалентное (по Мизесу) напряжение 0,73 МПа (рис. 5).

Ресурс кольца составил 90000 циклов (точка R на рис. 3), что хорошо соответствует кривой усталости. Причем материал МР разрушается (происходит обрыв проволок) именно в местах максимальных эквивалентных напряжений. Точка P (рис. 3) с напряжением 0,53 МПа и ресурсом 900000 циклов, также соответствует кривой усталости.

Таким образом, для расчета ресурса виброизоляторов из материала МР можно пользоваться общей формулой (1) для расчета запаса прочности при циклическом напря-

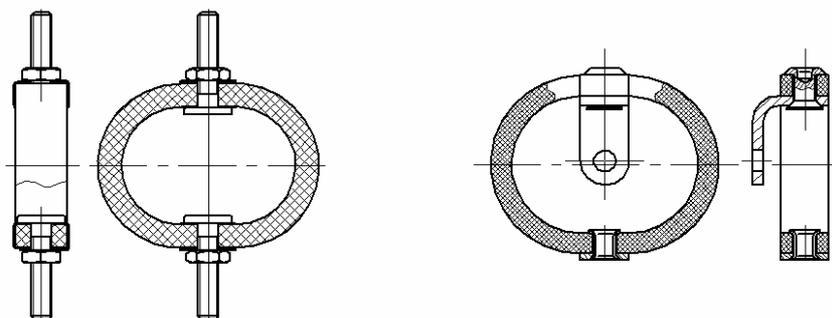


Рис. 4. Виброизоляторы из материала МР кольцевого типа

жении. Необходимые для этого справочные данные (кривые $\sigma_{-1}(N)$ и $\tau_{-1}(N)$, коэффициент ψ_{σ}) приведены в настоящей работе. Для увеличения ресурса виброизоляторов из МР следует увеличивать относительную плотность материала и диаметр проволок, и применять твердую смазку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чегодаев Д.Е., Мулюкин О.П., Колтыгин Е.В. Конструирование рабочих органов машин и оборудования из упругопористого материала МР: Ч.1. Самара: СГАУ, 1994.
2. Рудицин М.Н., Артемов П.Я., Любошиц М.И. Справочное пособие по сопротивлению материалов. Минск: Высшая школа, 1970.
3. Пономарев Ю.К., Уланов А.М., Цзян Хунюань, Ся Юйхун. Расчет кольцевых виброизоляторов из материала МР с помощью

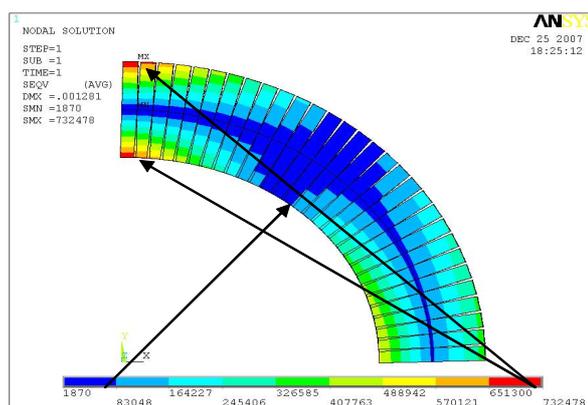


Рис. 5. Максимальные эквивалентные напряжения в кольцевом виброisolаторе

- эквивалентного модуля упругости// Новые материалы и технологии в машиностроении. Выпуск 2. Брянск: БГТИА, 2003.
4. Пономарев Ю.К., Уланов А.М. Упругие константы материала МР// Наука и технологии. Том 1. Труды XXVI Российской школы. М.: РАН, 2006.

THE FATIGUE LIMIT OF MR MATERIAL FOR DIFFERENT LOAD DIRECTION

© 2008 A.M. Ulanov, Yu.K. Ponomarev

Samara State Aerospace University

A wire damping material MR (Metal Rubber) is used widely for vibration and shock protection of different equipment. The results of researching of fatigue limit of MR material for different load direction are presented, a fatigue curves are obtained. An influence of parameters of material and lubricant on fatigue limit is researched. A method of calculation of life-time of vibration isolator made of MR material is proposed.