

## Влияние состояния контактов на диссипативные свойства материала на основе непрерывных волокон нержавеющей стали

В. А. Зорин, Ю. Ф. Луговской, М. В. Лучка

*Эффективность виброизоляторов существенно зависит от уровня их демпфирующих свойств. Для конструктивных элементов, обеспечивающих демпфирование, находят применение материал на основе металлических волокон. Исследовано влияние на диссипативные свойства материала на основе непрерывных металлических волокон состояния межволоконных контактов. Показано, что высокий уровень диссипативных свойств обеспечивается упругостью и подвижностью волокон в контактных узлах и находится в зависимости от площади межволоконных контактов.*

**Ключевые слова:** диссипативные свойства, материал, металлические волокна, межволоконные контакты.

### Введение

Эффективность виброизоляторов или амортизаторов существенно зависит от уровня демпфирующих свойств используемых в них материалов. Коэффициент виброизоляции амортизатора  $\lambda$  характеризуется отношением виброускорения на выходе из амортизатора  $a_{\max}$  к ускорению приложенной синусоидальной вибрации  $A_{\max}$  и зависит от различных факторов, согласно формуле из справочника под редакцией К. В. Фролова [1]

$$\lambda = a_{\max}/A_{\max} = \{(1 + 4v^2z^2)/[(1 - z^2)^2 + 4z^2v^2]\}^{0,5}, \quad (1)$$

где  $v$  — относительное демпфирование,  $v = n/f_0$  ( $n$  — приведенный коэффициент демпфирования, определяемый по формуле  $n = \delta/2m$ , где  $\delta$  — коэффициент демпфирования системы амортизации);  $z$  — относительная частота внешнего воздействия определяется по формуле  $z = f/f_0$  ( $f$  — частота внешнего моногармонического воздействия;  $f_0$  — собственная частота системы амортизации рассчитывается по формуле  $f_0 = (c/m)^{0,5}$ , где  $c$  — жесткость системы амортизации;  $m$  — масса амортизируемого объекта).

Анализ зависимости (1) показывает, что при  $z = 1$  (при резонансе) с ростом  $v$  величина  $\lambda$  уменьшается — виброизоляция улучшается. В зоне частот, превышающих резонансные ( $z > 1,4$ ), повышение  $v$  приводит к увеличению  $\lambda$ .

Таким образом, эффективность виброизоляторов определяется как массой амортизируемого объекта, так и упругими, а также демпфирующими свойствами амортизатора и, соответственно, упругими и демпфирующими свойствами элементов и материалов, из которых они создаются.

### Постановка задачи

Наиболее часто в амортизаторах используют резиновый массив, соединенный с металлической крепежной арматурой. При этом применяется силиконовая резина с высокими демпфирующими свойствами в

диапазоне рабочих температур  $-60 \dots +125$  °С. В качестве демпфирующих элементов используется также прессованный проволочный массив с диапазоном рабочих температур  $-60 \dots +250$  °С. Работоспособность демпфирующих материалов из металлической проволоки при высоких температурах в некоторых областях техники является определяющей.

В ИПМ НАН Украины проведены исследования условий получения и свойств материалов и изделий из дискретных волокон меди и нержавеющей стали [2], а также на основе непрерывных металлических волокон [3]. Последние получали прессованием полуфабрикатов — вязаных сеток из проволоки, обладающих объемностью и эластичностью. Такая технология позволила получать материалы с заданной структурой и свойствами. Диссипативные свойства пористых волоконных материалов исследованы в работе [3], упругие свойства — Ю. Ф. Луговским и В. А. Зориным в работе [4].

Существенной особенностью пористых материалов с организованной структурой на основе непрерывных металлических волокон является то, что они, в отличие от спеченных пористых материалов, обладают подвижными контактами. Такие квазисплошные материалы состоят, фактически, из макроподвижных петельных структурных элементов. При деформировании материала имеет место проскальзывание в точках или областях контакта. Механизм такого конструкционного демпфирования описан Я. Г. Пановко в работе [5]. Согласно ему, проскальзывание должно развиваться от элементов с меньшей силой трения к элементам с большей силой трения, то есть от элементов с меньшей к элементам с большей длиной. При этом показано, что конструкционное демпфирование на порядок превышает рассеяние энергии в самом материале трущихся элементов [5]. Обычно рассеяние энергии, то есть диссипативные свойства материала, оценивают по величине его декремента колебаний — величине относительного рассеяния энергии, определяемого по методикам, которые описаны Г. С. Писаренко, В. В. Матвеевым и А. П. Яковлевым в работе [6].

Очевидно, что эта характеристика в месте сочленения структурных элементов будет зависеть от коэффициента трения между ними и площади контакта. Однако количественных соотношений между этими величинами в исследуемых материалах найти не удалось.

Цель работы — установить качественную и количественную связь между диссипативными свойствами и состоянием контактов в материалах на основе непрерывных металлических волокон.

### **Материалы и методы исследования**

Исследовали демпфирующие элементы, изготовленные на основе проволоки из нержавеющей стали диаметром 0,2 мм, которая была предварительно переработана в вязаные сетки (полуфабрикаты) с организованной петельной структурой. Образцы имели форму шайб с наружным диаметром 54 мм, внутренним — 25 мм, высотой 16 мм и пористостью 82%. Эти образцы использовали как исходные. Из них в дальнейшем изготавливали образцы с меньшей пористостью прессованием в цилиндрической пресс-форме.

На практике для получения металловолоконных изделий с заданными размерами и пористостью их заготовки прессуют с учетом упругого последействия. То есть осуществляют перепрессовку, сопровождающуюся

уплотнением заготовок в пресс-форме до размеров по высоте меньших, чем у изделия. Такая перепрессовка сопровождается процессами смещения, деформирования волокон и вызванными ими изменениями площадей контакта. Для изучения влияния перепрессовки на диссипативные свойства изготовлены две группы образцов с различной степенью перепрессовки. В первой группе — образцы с перепрессовкой 34%, а во второй — 14%.

Кроме того, исследовали образцы, прошедшие вакуумное спекание при температуре 1350 °С в течение 3 ч. В процессе спекания в приспособлении обеспечивалась осадка заготовок до высоты 13 мм. Таким образом, образцы высотой 13 мм после спекания имели в точках контакта спеченные волокна, которые были лишены возможности проскальзывания относительно друг друга.

Схема нагружения образцов при испытаниях на рассеяние энергии максимально приближена к той, что имеет место в реальных амортизаторах. Для этого два одинаковых исследуемых образца закрепляли в устройстве, представляющем собой двусторонний упор с инерционной массой между образцами. Образцы двух групп с различной степенью перепрессовки сжимали в приспособлении предварительным натягом до высоты 10,1 мм и пористости 71%. Исследование образцов, спеченных перед испытаниями и неспеченных, осуществляли в приспособлении с предварительным натягом до высоты 12 мм и пористости 76%. Устройство устанавливали на подвижный стол электродинамического вибростенда ВЭДС-200. В указанной колебательной системе возбуждались продольные колебания. На частоте 100—200 Гц инерционная масса попадала в режим резонансных продольных колебаний. Измеряли амплитудно-частотную характеристику исследуемой системы и при этом определяли декремент её колебаний в зависимости от уровня возбуждения и, соответственно, амплитуд колебаний инерционной массы по методике [3].

### Результаты и их анализ

Результаты испытаний представлены на рис. 1, а в виде зависимости декремента колебаний материалов  $\delta$  от амплитуды циклической деформации образцов  $\epsilon$ . Все зависимости носят монотонно возрастающий характер. Это отличает их от аналогичных зависимостей  $\delta$ — $\epsilon$  для спеченных материалов на основе дискретных волокон меди, которые, по данным Ю. Ф. Луговского и Л. И. Чернышева, имеют горизонтальный участок [7]. Кроме того, максимальные значения как  $\delta$ , так и  $\epsilon$  исследованных в нашей работе материалов превышают данные работы [7], приведенные на рис. 1, б, более чем в два раза. Это указывает на значительное преимущество исследованных материалов как по величине демпфирования, так и по уровню рабочих нагрузок.

На рис. 1, а также видно, что образцы, изготовленные с большей степенью перепрессовки, показали более высокие значения декремента колебаний. По всей видимости, при увеличении перепрессовки в точках контакта имело место появление пластически деформированных объемов материала волокон. Точечные контакты преобразовались в контакты по площади с большим рассеянием.

Изменение точечного контакта между волокнами по площади может происходить и в тех случаях, когда волокна длительное время трутся друг

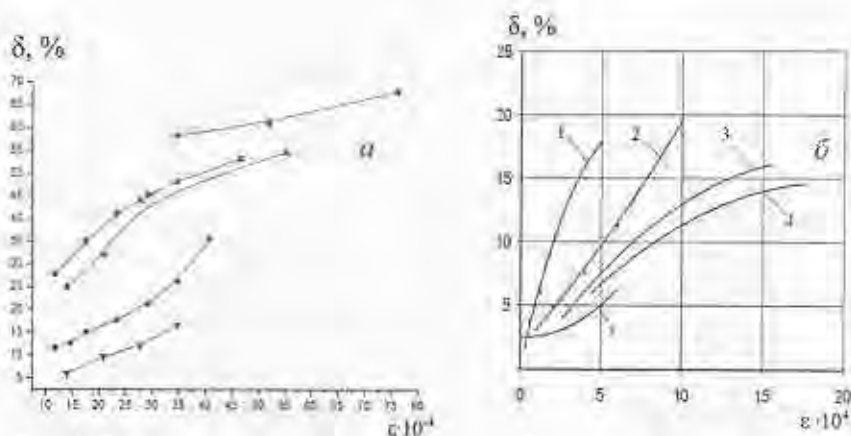


Рис. 1. Зависимости декремента колебаний  $\delta$  от амплитуды циклической деформации  $\epsilon$  образцов материалов на основе непрерывных металлических волокон ( $\blacksquare$ ,  $\bullet$  — образцы пористостью 76%, неспеченные и спеченные соответственно;  $\blacktriangle$ ,  $\blacktriangledown$  — образцы пористостью 71% с перепрессовкой 34 и 14% соответственно;  $\blacklozenge$  — образцы пористостью 71% с перепрессовкой 34%, прошедшие приработку) (а) и на основе дискретных волокон меди для различных значений  $\theta$  (%): 1 — 40,1; 2 — 57,4; 3 — 69,1; 4 — 76,0; 5 — медь (компактный материал), полученные при изгибных колебаниях балочных консольно закрепленных образцов [7] (б).

о друга под действием вибрации. Поэтому исследовали состояние волокон в точках взаимного контакта у образцов, подвергнутых длительной виброн нагрузке. Структура одного из образцов, подвергнутого виброн нагрузке в течение 27 ч, представлена на рис. 2. Для демонстрации контактов на одном из волокон пересекающие его два волокна перед фотографированием структуры были несколько смещены. На волокне видны площадки (отмеченные кружочками), появившиеся в результате его трения об отодвинутые волокна. При этом на рис. 1, а представлены значения декремента колебаний образцов, подвергнутых длительной виброн нагрузке (обозначены  $\blacklozenge$ ). Они несколько больше по величине, чем у аналогичных образцов, не прошедших “приработку” длительной виброн нагрузкой.

Сопоставление зависимостей  $\delta$ — $\epsilon$  спеченных и неспеченных образцов показывает, что спеченные образцы имеют уровень демпфирующих свойств значительно ниже, чем неспеченные той же пористости. Так, при циклической деформации  $\epsilon = 2 \cdot 10^{-3}$  и  $4 \cdot 10^{-3}$  декремент колебаний спеченных образцов был ниже на 58 и 34% соответственно.

Влияние нагрузки и площади контактов под нагрузкой на рассеяние энергии стальных пластин (коэффициент поглощения  $\psi = 2\delta$ ) исследовано в ряде работ [1]. На рис. 3, а представлена схема эксперимента, а на рис. 3, б — зависимость



Рис. 2. Фрагмент структуры демпфирующего элемента на основе непрерывных металлических волокон после длительной вибрационной нагрузки с волокном, имеющим следы износа.



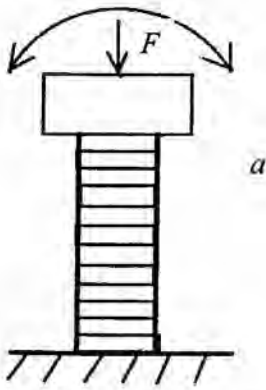


Рис. 3. Схема определения влияния усилия сжатия плоских подвижных стыков с прямоугольными контактными зонами на рассеяние энергии (а) и зависимость коэффициента поглощения  $\psi$  от давления сжатия  $P$  (б) [1].

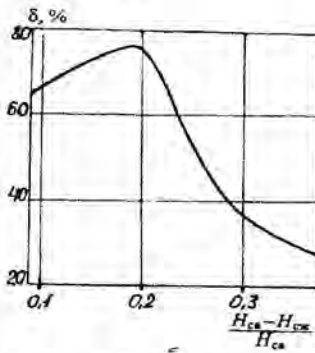
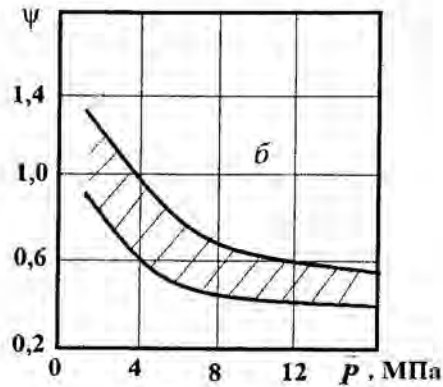


Рис. 4. Зависимости декремента колебаний  $\delta$  от величины статической деформации сжатия  $\epsilon_{ст}$  образцов материалов на основе непрерывных металлических волокон [3].

величины  $\psi$  от давления сжатия контактов  $P$ . Авторы работы [1] делают вывод, что с повышением контактного давления величина  $\psi$  постепенно уменьшается. Кроме того,

коэффициент поглощения возрастает с увеличением ширины поверхности (площади) контакта. Это следует из выражения  $P = F/S$ , где  $F$  — сила прижатия;  $S$  — площадь контакта. Очевидно, что с ростом  $S$  величина  $P$  уменьшается и, как видно на рис. 3, а, величина  $\psi$  возрастает. Это подтверждается и данными работы [3], где приведена зависимость  $\delta$  от статической деформации сжатия исследованных образцов  $\epsilon_{ст} = (H_{св} - H_{сж})/H_{св}$  (рис. 4). Она подобна той, что приведена на рис. 3, б. При этом на участке сжатия при  $\epsilon_{ст} = 20\text{--}40\%$  сопоставляемые зависимости имеют одинаковый характер — снижение  $\delta = \psi/2$ , а на участке увеличения  $\epsilon_{ст}$  от 10 до 20% зависимость на рис. 4 имеет возрастающий характер. Эти результаты указывают на то, что при сжатии неспеченного пористого материала до уровня  $\epsilon_{ст} = 20\%$  увеличивается число контактов в единице объёма или величина  $S$  и поэтому  $\delta$  возрастает. При увеличении  $\epsilon_{ст}$  от 20 до 40% возрастает лишь сила прижатия  $F$  и, соответственно, давление  $P$  на контактных площадках, что приводит к снижению рассеяния энергии.

### Выводы

Экспериментально показано, что в неспеченном пористом материале на основе непрерывных волокон нержавеющей стали декремент колебаний более чем в два раза превышает аналогичный показатель спеченного материала на основе дискретных волокон меди той же пористости.

Декремент колебаний спеченных пористых материалов на основе непрерывных металлических волокон почти в два раза меньше декремента

колебаний неспеченных. Очевидно, это различие обусловлено действием конструкционного демпфирования в местах взаимного контакта неспеченных волокон.

При длительной вибрационной нагрузке рассеяние энергии в волокновом материале может возрастать за счет приработки — притирки волокон друг к другу в местах взаимных контактов.

Преобразование точечных подвижных контактов между волокнами в контакты по площадкам при постоянной нагрузке на образец приводит к увеличению рассеяния энергии за счет снижения давления между контактирующими волокнами в соответствии с зависимостью  $\delta = A/P$ , где  $A$  — постоянная, а  $P = F/S$ .

1. *Вибрации в технике: (Справ.). В 6-ти т. / Ред. совет: В. Н. Челомей (предс.). — М. : Машиностроение, 1981. — Т. 6. Защита от вибраций и ударов / Под ред. К. В. Фролова. — 1981. — 456 с.*
2. *Косторнов А. Г. Проницаемые металлические волокновые материалы. — К. : Техника, 1983. — 128 с.*
3. *Зорин В. А. Исследование диссипативных свойств проницаемых материалов на основе непрерывных волокон // Современные проблемы физического материаловедения. — К. : Ин-т пробл. материаловедения НАН Украины. — 2007. — Вып. 16. — С. 122—127.*
4. *Луговской Ю. Ф. Модуль упругости и показатель качества высокопористых материалов на основе непрерывных волокон нержавеющей стали / Ю. Ф. Луговской, В. А. Зорин // Там же. — 2008. — Вып. 17. — С. 140—144.*
5. *Пановко Я. Г. Внутреннее трение при колебаниях упругих систем. — М. : Физматгиз, 1960. — 281 с.*
6. *Писаренко Г. С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. — К. : Наук. думка, 1971. — 375 с.*
7. *Луговской Ю. Ф. Демпфирующие свойства спеченных высокопористых материалов на основе порошков и на основе дискретных волокон меди / Ю. Ф. Луговской, Л. И. Чернышев // Порошковая металлургия. — 2006. — № 11/12. — С. 106—113.*

### **Вплив стану контактів на дисипативні властивості матеріалу на основі бесперервних волокон нержавіючої сталі**

В. О. Зорін, Ю. Ф. Луговський, М. В. Лучка

*Ефективність віброізоляторів суттєво залежить від рівня їх демпфуючих властивостей. Для конструктивних елементів, що забезпечують демпфування, застосовується матеріал на основі металевих волокон. Досліджено вплив на дисипативні властивості матеріалу на основі бесперервних металевих волокон станів міжволокнових контактів. Показано, що високий рівень дисипативних властивостей забезпечується пружністю та рухомістю волокон у контактних вузлах і знаходиться в залежності від площі міжволокнових контактів.*

**Ключові слова:** дисипативні властивості, матеріал, металеві волокна, міжволокнові контакти.

### **Effect of contact states on dissipative properties of material based on continuous stainless steel fibers**

V. A. Zorin, Y. F. Lugovskoi, M. V. Luchka

*Efficiency of vibroinsulators substantially depends on a level their antivibration properties. For construction elements which provide damping, finds application material on the basis of metallic fibres. Investigational influence is on dissipative properties of material on the basis of continuous metallic fibres of the states of interfibre contacts. It is shown that the high level of dissipative properties is provided a resiliency and mobility of fibres in contact knots and is depending on the area of interfibre contacts.*

**Keywords:** dissipative properties, material, metallic fibers interfibre contacts.