

В. В. ГРУЗИН, В. П. КАНДИДОВ, А. Н. ПАНКРАТОВА, В. И. ШМАЛЬГАУЗЕН

О ДЕМПФИРОВАНИИ КОЛЕБАНИЙ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИМИ МАТЕРИАЛАМИ В ПОЛОСЕ С УПРУГИМИ РЕБРАМИ

Экспериментально исследуются демпфирующие свойства полосы с периодически расположенными ребрами при заполнении промежутков между ними различными вибропоглощающими материалами и покрытиями. Поглощающие фильтры, использующие колебания ребра, имеют резонансную зависимость коэффициента затухания от частоты. При наклеивании на ребра полосы из бутил-каучука коэффициент затухания достигает 4—5 дБ на одно ребро. Численное исследование проведено для фильтра из одного ребра с вязким трением на конце.

Для демпфирования вибраций широко используются покрытия из вязкоупругих материалов [1], многослойные конструкционные материалы, имеющие большой коэффициент потерь [2]. В конструкциях с ребрами, жесткости поглощающие материалы могут быть нанесены на ребра. Эффективность демпфирования ребер для случая диффузного поля в полосе рассматривается в [3]. В настоящей работе исследуются различные материалы и способы их размещения для ослабления колебаний в полосе, у которой расстояние между ребрами меньше длины волны.

При распространении изгибно-продольных волн в полосе с упругими ребрами существуют области частот, в которых амплитуда поперечных колебаний ребра значительно больше смещений в полосе. Расчеты показывают, что эти области лежат в окрестности собственных частот консольно закрепленного ребра f_{11} и амплитуда колебаний его конца при определенных параметрах системы более чем в десять раз превышает амплитуду волны. Если связать движение ребра с деформацией вязкоупругого материала, то можно получить эффективное рассеяние энергии в узком диапазоне частот. Исследование проводилось на дюралюминиевой полосе с периодически расположенными ребрами (рис. 1). $b=7 \cdot 10^{-3}$, $t=4,1 \cdot 10^{-3}$, $h=3,4 \cdot 10^{-3}$, $l=1,6 \cdot 10^{-3}$ м; $E=7,1 \cdot 10^{10}$ н/м², $\rho=2,7 \cdot 10$ кг/м³; P —песок; конец O оставался свободным. Отрезок BC демпфировался вибропоглощающим материалом M , размещенным в n -промежутках между ребрами. Для возбуждения колебаний использовалась распавшаяся струя воды S , которая имеет равномерный спектр в широкой полосе частот [5]. Изгибно-продольная волна отражалась от свободного конца O . От конца L отражение было незначительным; на ин-

терференционной картине, получаемой при движении струи S вдоль полосы, величина максимумов не превышала 0,5 дБ. Это достигалось благодаря использованию нагрузки на конце L в виде клина из пластилина, погруженного в песок P [1]. Стоячая волна, возникающая на отрезке OB , измерялась датчиком поперечных колебаний D типа ИС-579А, сигнал с которого выделялся на спектре-анализаторе С5-3 в полосе 200 Гц и регистрировался самописцем Н-110. Механизм протяжки бумаги самописца синхронизовался с частотой настройки спектра-анализатора f_c . Измерения проводились при различной длине отрезка BC и неизменной — OB .

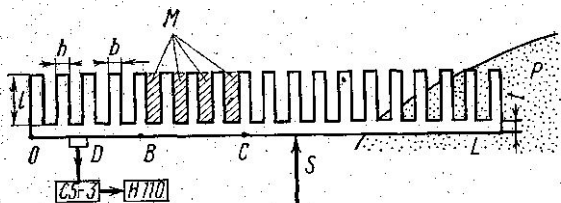


Рис. 1

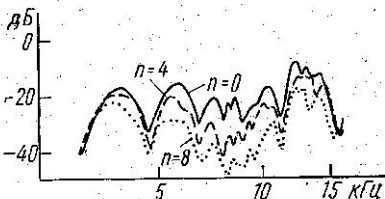


Рис. 2

На рис. 2 приведены в качестве примера осциллограммы, полученные при плотной забивке промежутков между ребрами, бутил-каучуком с молекулярным весом $3 \cdot 10^{-4}$ а. е. м. для $n=0, 4, 8$. Из анализа большого числа подобных осциллограмм видно, что зависимость амплитуды поперечных колебаний W на отрезке OB исследуемой системы приближенно описывается следующим законом:

$$W = Ae^{-an},$$

где a — коэффициент затухания на одном периоде. Величина коэффициента затухания a для заданной системы зависит от частоты f_c и определяется свойствами вибропоглощающего материала и способом его размещения в промежутках между ребрами.

На рис. 3 изображены графики $a(f_c)$ для трех различных материалов, заполняющих промежутки: бутил-каучук (сплошная линия); полиизобутилен с молекулярным весом $5 \cdot 10^5$ а. е. м. (штриховая кривая); виброизолирующая мастика, изготовленная на основе бутил-каучука, полиизобутилена и минеральных наполнителей, асбеста, окислов магния, бария (пунктирная кривая). Для улучшения адгезии вибропоглощающего материала к металлу их поверхности смазывались раствором материала в бензине. Коэффициент затухания a имеет резко выраженные максимумы на частотах $f_1=8$ кГц,

$$f_1^* \simeq f_{\perp 1} = 10,5 \text{ кГц} (\alpha_1 = 0,36, \alpha_1^* = 0,18).$$

Образование двойного максимума объясняется, видимо, следующим. На частотах $f < f_{\perp 1}$ в полосе с ребрами распространяются две волны совместных изгибно-продольных колебаний. В волне с преобладанием поперечного компонента смещения амплитуда колебаний ребер быстро возрастает при приближении к границе полосы полупрозрачности $f_c \simeq f_1$. При $f > f_1$ эта волна не распространяется. У другой волны размах колебаний ребер достигает максимума при $f = f_{\perp 1}$ [4]. Подобная зависимость получена в окрестности второй собственной частоты поперечных колебаний консольного ребра $f_{\perp 2} = 66$ кГц; здесь $\alpha_2 \simeq 0,30$.

На частотах, близких к собственным f_{1i} , наибольший размах колебаний имеет конец ребра. Поэтому энергия в основном поглощается в той части материала, которая находится в контакте с концами ребер. Так, при заполнении только верхней части промежутков бутил-каучуком $\alpha_1=0,28$, что близко к значению, приведенному на рис. 3. При наклеивании на торцы ребер полосы из этого же материала толщиной 4 мм $\alpha_1=0,33$. Увеличение α объясняется тем, что поглощение энергии связано в первую очередь со сдвиговой деформацией в вибропоглощающем материале [6]. В рассматриваемой системе при оклеивании ребер с одной боковой стороны армированным покрытием из бутил-каучука толщиной 2 мм и фольги 0,1 мм $\alpha_1=0,43$; при оклеивании ребер с двух сторон покрытием толщиной 1 мм — $\alpha_1=0,49$.

В последнем случае уменьшение амплитуды поперечного смещения в полосе достигает 4,2 дБ на один период поглотителя. Однако технологически более простыми являются первые два способа демпфирования.

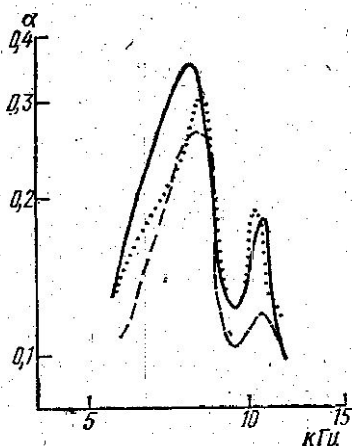


Рис. 3

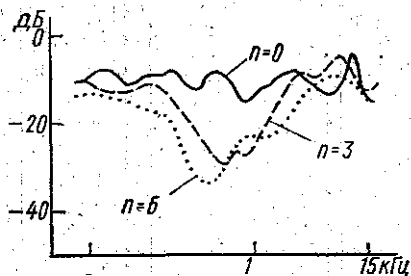


Рис. 4

При исследовании фильтра, содержащего конечное число ребер, рассматривалась полоса, у которой ребра были только на отрезке ВС. Для такой системы описанная выше методика оказалась неприменимой, так как конец L полосы без ребер при погружении в песок имеет большой коэффициент отражения. Величина максимума на интерференционной картине составляла 5–7 дБ. Для исследования использовалась схема, приведенная в [1]. Система возбуждалась струей S, направленной в свободный край полосы. Амплитуда волны, прошедшей через фильтр, измерялась датчиком D, расположенным на отрезке CL.

На рис. 4 приведены осциллограммы, снятые для $n=0, 3, 6$ при наклеивании бутил-каучука на торцы ребер. Из сравнения осциллограмм видно, что максимальное снижение уровня поперечного компонента в волне составляет: на фильтре из трех ребер приблизительно 18 дБ, на фильтре из шести ребер — 25 дБ. При заполнении промежутков между ребрами бутил-каучуком снижение уровня поперечных колебаний имеет близкие значения.

Теоретическое исследование прохождения волн через описанные фильтры связано с большими трудностями. Поэтому для качественного сравнения с экспериментом рассматривалась модель фильтра из одного

ребра, в котором действие поглощающего материала представлялось силой трения на конце ребра, равной $F_{тр} = -k \frac{\partial y}{\partial t}$, где y — поперечное смещение на конце ребра, k — коэффициент трения. Из условий сопря-

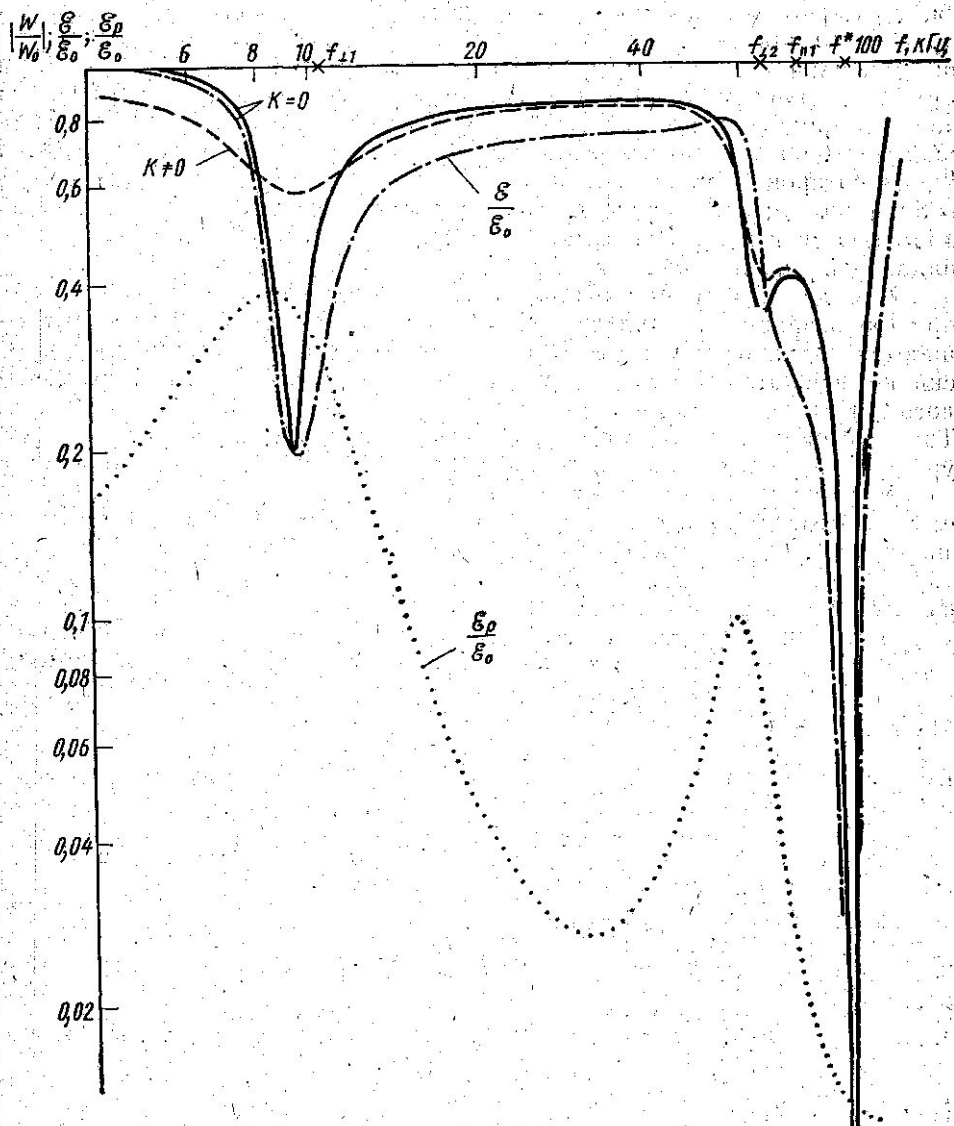


Рис. 5

жения смещений и усилий в корне ребра получена система шести алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами, из которых определялись амплитуды и фазы прошедших и отраженных волн при известной падающей волне. Расчеты производились на ЭВМ «Мир-1». Результаты приведены на рис. 5, где представлена зависимость ампли-

туды прошедшей изгибной волны W от частоты в случае падения на фильтр изгибной волны — W_0 . (При $k=0$ — сплошная линия, при

$$k = 0,2 \sqrt{\omega} (m^3 EI)^{1/4} = 0,2 \sqrt{2\pi f_{\perp 1}} \left(\frac{\rho^3 h^3 E}{12} \right)^{1/4} \text{ — штриховая.}$$

На частотах $f_{\perp 1}$ амплитуда прошедшей изгибной волны уменьшается, отраженной — увеличивается и достигает $0,82 W_0$ при $f_{\perp 1}$, $0,72 W_0$ при $f_{\perp 2}$. Амплитуда продольных волн, возникающих из-за несимметричного расположения ребра, достигает максимальных значений при $f_{\perp 1}$, $f_{\perp 2}$, равных $0,17 W_0$ и $0,37 W_0$ соответственно. На собственной частоте продольных колебаний ребра $f_{\parallel 1} = 79$ кГц амплитуда прошедшей изгибной волны относительно велика. Наконец, имеется частота f^* , на которой ребро является «фильтром-пробкой» для падающей изгибной волны; амплитуды продольных волн и прошедшей изгибной обращаются в нуль. Зависимость прошедшей энергии \mathcal{E} , отнесенной к падающей \mathcal{E}_0 , изображена на рис. 5 штрих-пунктирной кривой.

При демпфировании ребра ($k \neq 0$) амплитуда прошедшей волны при $f_{\perp 1}$ возрастает, амплитуды продольных волн и отраженной уменьшаются. Однако на частоте f^* фильтрующие свойства ребра практически не меняются. Увеличение амплитуды прошедшей волны наблюдалось при экспериментальном исследовании фильтра на отдельном ребре. Так, при оклеивании его с одной стороны покрытием из бутил-каучука уровень смещения на $f_{\perp 1}$ возрос на 10 дБ.

Доля энергии прошедших волн при демпфировании ребра возрастает на частотах $f_{\perp 1}$ и остается неизменной при f^* (пунктирная кривая на рис. 5). Одновременно растет энергия, рассеянная на фильтре, \mathcal{E}_p (кривая из звездочек). Незначительная величина \mathcal{E}_p при f^* объясняется тем, что на этой частоте амплитуда поперечных смещений на конце ребра невелика; она равна W_0 .

Исследованная система является простой одномерной моделью конструкций с ребрами жесткости. Полученные результаты могут быть использованы для резонансного подавления колебаний в узкой полосе частот путем демпфирования ребер, «настроенных» на частоту $f_{\perp 1}$. Виброизоляция может быть осуществлена с помощью «фильтра-пробки» на ребрах, «настроенных» на частоту f^* .

ЛИТЕРАТУРА

1. Никифоров А. С., Будрин С. В. Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. Л., 1968.
2. Морозова Н. И., Никонова О. М. В сб.: Вибропоглощающие материалы и покрытия и их применение. Материалы семинара. Л., 1974, с. 3—5.
3. Никифоров А. С. «Акустический журнал», 1973, 19, № 3, 401—403.
4. Демиденко Т. Ф., Кандидов В. П., Шмальгаузен В. И. Распространение волн в стержне с резонансными ребрами. «Акустический журнал», (в печати).
5. Демиденко Т. Ф., Степанова Н. В., Шмальгаузен В. И. «Вестн. Моск. ун-та. Сер. III, физ., astron.», 1971, 12, № 5, 534—540.
6. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров. М., 1963.

Поступила в редакцию
1.4 1975 г.

Кафедра
общей физики для мехмата