АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том V 1959 Вып. 2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Н. И. Наумкина, Б. Д. Тартаковский, М. М. Эфрусси

Описывается экспериментальная методика исследования динамических упругих свойств материалов, предназначенных для ослабления вибраций, распространяющихся по металлическим элементам машин и конструкций.

Измерены динамические модули Юнга и коэффициенты потерь группы искусственных материалов, созданных на основе битума, переработанной резины и различных наполнителей. Модуль Юнга этих материалов составляет от $2 \cdot 10^9$ до $6 \cdot 10^{10}$ *дин/см*^{2} и соответствующие коэффициенты потерь 0,4—0,1. Измерения производились в диапазоне 10—100 *гц*.

Одним из лучших вибропоглощающих материалов является фетр, пропитанный битумом (модуль Юнга 10^9 *дин/см*^{2}, коэффициент потерь 2,5).

Одним из новых средств ослабления шума, вызываемого вибрациями, распространяющимися по жестким элементам машин и металлических конструкций, является нанесение на вибрирующие элементы специальных покрытий, характеризуемых достаточно высокими внутренними потерями. Нанесение этих покрытий увеличивает активные потери механических колебаний и тем самым уменьшает долю колебательной энергии, приходящуюся на излучаемый шум.

По аналогии с звукопоглощающими материалами такие покрытия целесообразно называть вибропоглощающими. Практическому применению этого способа и его экспериментальному исследованию в последние годы посвящен ряд работ, где рассматриваются вопросы расчета и лабораторного исследования отдельных вибропоглощающих материалов [1]. К сожалению, ценность этих работ уменьшается из-за отсутствия данных о составе вибропоглощающих материалов. В связи с этим мы сочли полезным опубликовать результаты исследования некоторых вибропоглощающих материалов, проведенного нами еще в 1953—55 гг., опустив ради краткости изложение расчета и методики измерения, сходных с уже опубликованными.

Общая жесткость на изгиб металлического стержня (единичной ширины) с вибропоглощающим покрытием и его коэффициент потерь при колебаниях чистого изгиба соответственно равны [2]:

$$B = B_1 \frac{1 + 2\alpha\,[2\beta + 3\beta^2 + 2\beta^3] + \alpha^2\beta^4}{1 + \alpha\beta}, \tag{1}$$

$$\eta = \eta_2 \frac{\alpha\beta}{1 + \alpha\beta} \frac{3 + 6\beta + 4\beta^2 + 2\alpha\beta^3 + \alpha^2\beta^4}{1 + 2\alpha\,(2\beta + 3\beta^2 + 2\beta^3) + \alpha^2\beta^4}, \tag{2}$$

где B — общая жесткость на изгиб составного стержня (единичной ширины), $\alpha = E_2 / E_1$; E_2 — модуль Юнга вибропоглощающего покрытия, E_1 — модуль Юнга металлического стержня, h_1 — толщина металлического стержня, $\beta = h_2 / h_1$; h_2 — толщина вибропоглощающего покрытия, $B_1 = E_1 h^3{}_1 / h^{12}$ — жесткость на изгиб непокрытого металлического стержня с прямоугольным поперечным сечением (единичной ширины), η — средний

коэффициент потерь составного стержня, η_2 — коэффициент потерь вибропоглощающего покрытия.

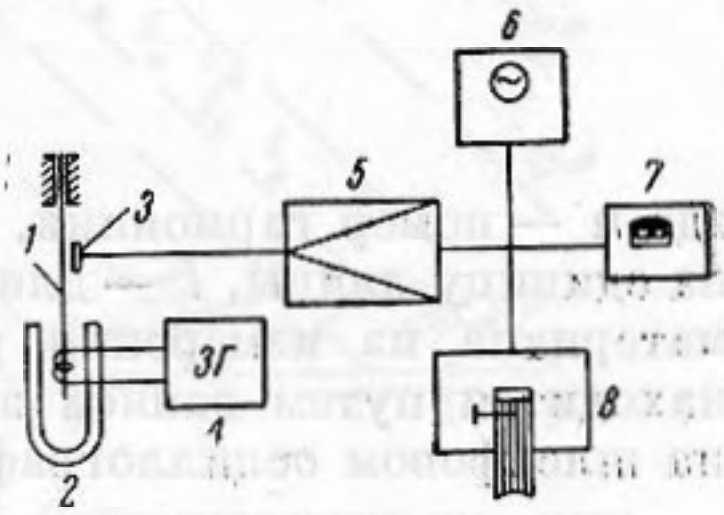
Учитывая, что вибропоглощающие материалы гораздо мягче металлического стержня ($\alpha \sim 10^{-2} \div 10^{-3}$), выражение для среднего коэффициента потерь можно записать так:

$$\eta = \eta_2 \alpha\beta (3 + 6\beta + 4\beta^2) B_1 / B. \qquad (3)$$

При возрастании толщины покрытия коэффициент потерь составного стержня приближается к коэффициенту потерь вибропоглощающего покрытия

$$\lim_{\beta\to\infty} \eta = \lim_{\beta\to\infty} \eta_2 \frac{\alpha\beta}{1+\alpha\beta} \frac{3 + 6\beta + 4\beta^2 + 2\alpha\beta^3 + \alpha^2\beta^4}{1 + 2\alpha(2\beta + 3\beta^2 + 2\beta^3) + \alpha^2\beta^4} = \eta_2. \qquad (3а)$$

Следовательно, при больших толщинах покрытия ($\beta \geqslant 1$) потери металлического стержня с вибропоглощающим покрытием зависят лишь от потерь



Фиг. 1. Блок-схема измерения модуля упругости E и коэффициента потерь η однородного стержня:

1 — измеряемый образец, *2* — электромагнитный возбудитель, *3* — электромагнитный приемник, *4* — генератор звуковых частот, *5* — усилитель, *6* — электронный осциллограф, *7* — ламповый вольтметр, *8* — быстродействующий регистратор уровня

в самом вибропоглощающем материале. При малых толщинах покрытия, как видно из (2), коэффициент потерь η зависит от произведения $\eta_2 E_2$, т. е. от мнимой части модуля упругости $\overline{E_2} = E_2 + i\eta_2 E_2$. При этом величины η_2 и E_2 в отдельности роли не играют. В обоих случаях потери не зависят от массы вибропоглощающего покрытия. Таким образом, для использования вибропоглощающих материалов, с целью ослабления изгибных колебаний, необходимо измерять характеризующие их величины η и E.

Измерения η и E вибропоглощающих материалов проводились нами в условиях, близких к их использованию на практике: при возбуждении изгибных колебаний стержней на звуковых частотах. По одному из вариантов метода измерения стержень изготовлялся из испытуемого материала (метод однородного стержня). Когда исследуемые материалы были настолько мягкими или тонкими, что не представлялось возможным изготовить из них достаточно прочные стержни, они наносились однородным слоем на металлические полосы (метод составного стержня, описанный в [2]). Первый метод проще, но применим лишь для достаточно прочных материалов, второй метод универсален, однако имеет тот недостаток, что требует гораздо большей точности акустических измерений. Нами были использованы оба метода.

Блок-схема измерения методом однородного стержня представлена на фиг. 1. Для измерений брались полосы материала шириной 10—15 *мм* и толщиной 2—5 *мм*; один конец полосы твердо зажимался, другой оставлялся свободным. Свободная длина образца менялась в опытах в пределах 10—30 *см*. При помощи электромагнитной системы, расположенной у свободного конца исследуемого образца, в нем возбуждались изгибные колебания. Электромагнитная система состояла из постоянного магнита и помещенной между его полюсами электрической катушки, ось которой перпендикулярна линии, соединяющей полюсы магнита. Свободный конец исследуемого образца располагался по оси катушки. При прохождении через катушку сигнала от звукового генератора можно было приближенно считать, что на возбуждаемый конец действует поперечная периодическая сила. Так как исследуемые материалы — немагнитные,

для возможности возбуждения и приема вибраций электромагнитным способом на свободный конец и середину стержня наклеивалось по узкой полоске пермаллоевой фольги.

Прием вибраций производился магнитной системой телефона, помещаемой на некотором расстоянии от испытываемого образца. Электрическое напряжение на выходе приемного тракта сильно зависит от расстояния между приемником и вибрирующим стержнем. Измерить точно это расстояние в каждом отдельном случае было слишком сложно, поэтому этот метод приема не мог быть использован для определения абсолютных значений амплитуд колебательной скорости. Однако, поскольку снимаемое напряжение пропорционально колебательной скорости, то таким путем мы могли определить резонансную частоту стержня по максимуму электрического напряжения на выходе приемного тракта.

Используя известную формулу для собственной частоты колебания консольной балки (см. например, [3])

$$f_n = \frac{\beta_n^2}{2nl^2}\sqrt{\frac{B}{m}}, \tag{4}$$

где n — номер гармоники, $\beta_1 = 1{,}875$, $\beta_2 = 4{,}694$, $\beta_3 = 7{,}855$, m — масса на единицу длины, l — длина образца, мы определяли модуль упругости материала из измерения резонансной частоты. Коэффициент потерь η находится путем записи затухающего резонансного колебания образца на шлейфовом осциллографе.

$$\eta = \frac{1}{\pi}\ln\frac{A_n}{A_{n+1}} = \frac{1}{\pi m}\ln\frac{A_n}{A_{n+m}}, \tag{5}$$

где A_n — амплитуда вибраций.

В тех случаях, когда внутренние потери материала были малы ($\eta<0{,}01$), запись затухающих колебаний производилась на быстродействующем регистраторе уровня типа «Нейман». При этом определялась скорость затухания L *дб/сек*, связанная с коэффициентом потерь следующим соотношением:

$$L\ \text{дб}/\text{сек} = 27{,}29\, f\eta. \tag{6}$$

Анализ ошибок, допускаемых при измерениях, показал, что среднеквадратичная ошибка единичного измерения E порядка 3%, $\eta\sim5\%$.

В случае измерения методом составного стержня металлическая полоса размерами $125 \times 3 \times 0{,}4$ *см*^{3} с нанесенным на нее исследуемым материалом подвешивалась в горизонтальном положении. В целях уменьшения утечки колебательной энергии в держатели стержень подвешивался в узловых точках стоячей изгибной волны, образующейся на стержне при возбуждении его на одной из собственных частот. Кроме того, подвес стержня осуществлялся через механические фильтры, состоящие из свинцовых грузиков, соединенных упругими нитями. Полоса пропускания частот этих фильтров лежала ниже низшей собственной частоты изгиба стержня. Возбуждение и прием вибраций осуществлялись так же, как и в методе однородного стержня. Блок-схема измерения методом составного стержня изображена на фиг. 2.

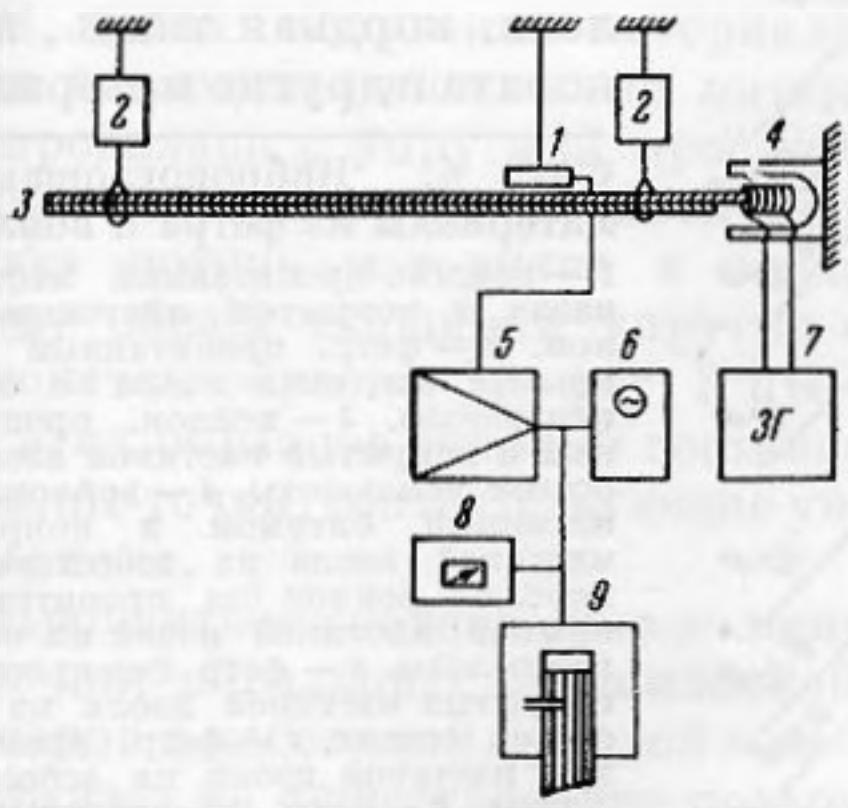
Для определения E и η исследуемого материала производились измерения резонансной частоты f и массы на единицу длины m стержня чистого и с покрытием, а также коэффициента потерь стержня с покрытием η. Резонансная частота стержня с свободными концами связана с его жесткостью на изгиб выражением:

$$f_n = \frac{\beta_n^2\pi}{2l^2}\sqrt{\frac{B}{m}}, \tag{7}$$

причем $\beta_1 = 1{,}505$, $\beta_2 = 2{,}499$, $\beta_n = n + {}^1/_2$ $(n>2)$. Можно показать, что из (1) и (7) следует

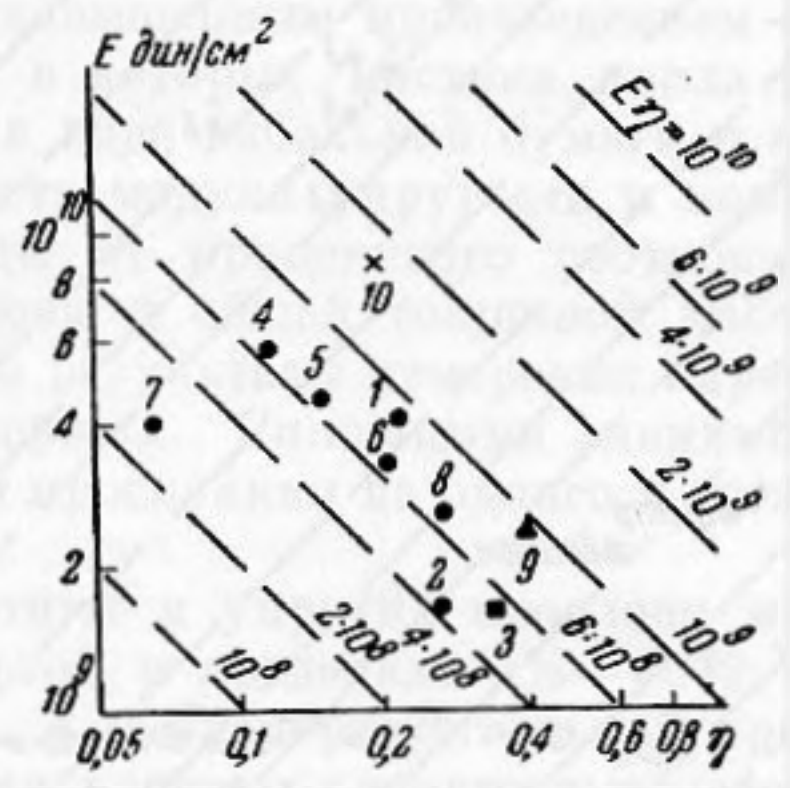
$$E_2 = E_1 \frac{(f/f_1)^2 m/m_1 - 1}{\beta\,[4 + 6\beta + 4\beta^2 - (f/f_1)^3 m/m_1]}, \tag{8}$$

где индекс 1 отмечает величины, относящиеся к чистому стержню, индекс 2 — к вибропоглощающему покрытию, величины без индекса — к составному стержню.



Фиг. 2. Блок-схема измерения модуля упругости E и коэффициента потерь η составного стержня:

1 — электромагнитный приемник, *2* — механические фильтры, *3* — составной стержень, *4* — электромагнитный возбудитель, *5* — усилитель, *6* — электронный осциллограф, *7* — генератор звуковых частот, *8* — ламповый вольтметр, *9* — быстродействующий регистратор уровня



Фиг. 3. Вибропоглощающие материалы типа изола:

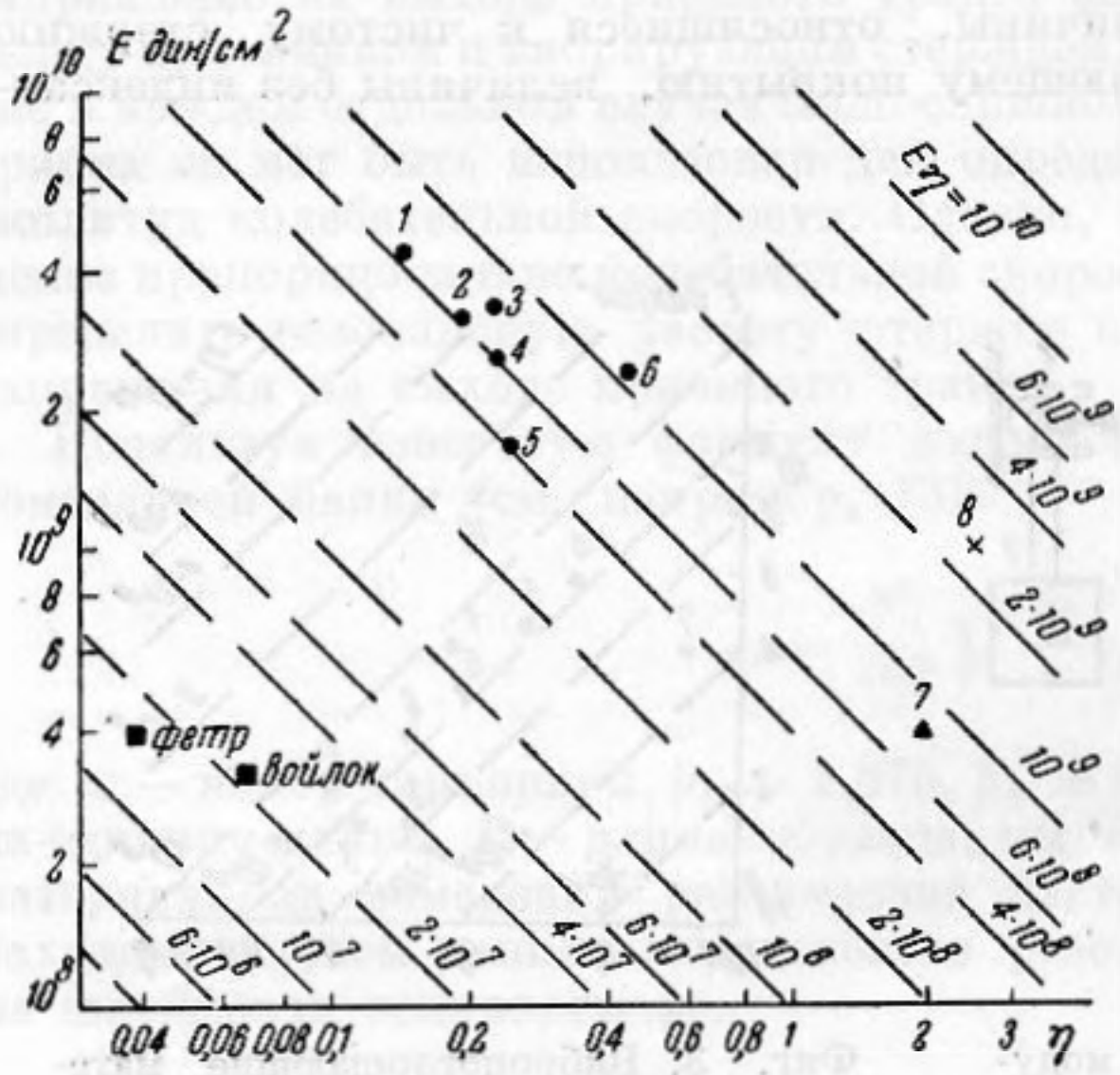
1 — изол без наполнителя. Изолы с наполнителем: *2* — дробленое стекло, *3* — длинное текстильное волокно, *4* — шлаковата, *5* — короткое волокно кордной ткани, *6* — длинное волокно кордной ткани, *7* — крошка недевулканизированной резины, *8* — короткое текстильное волокно, *9* — асбестовое волокно, *10* — целлюлозное волокно

Коэффициент потерь η_2 находится из (3), после того, как из измерений определяется коэффициент потерь составного стержня η. Среднеквадратичная ошибка единичного измерения методом составного стержня модуля упругости составляет менее 10%, коэффициента потерь — менее 12%.

Была исследована зависимость декремента колебаний от амплитуды и частоты. В результате выяснилось, что в пределах амплитуды смещения порядка 0,001—0,1 *мм* декремент колебания не зависит ни от амплитуды, ни от частоты в пределах всего измеренного частотного диапазона (10—200 *гц*). При амплитудах смещения порядка 1 *мм* декремент колебаний, как правило, увеличивается и становится зависимым от частоты. В связи с этим наши исследования проводились в амплитудно-частотном диапазоне, в котором каждый отдельный вибропоглощающий материал может характеризоваться единственным коэффициентом затухания и модуля упругости. Параметры E и η вибропоглощающих материалов, приводимые в данной работе, соответственно являются средними в диапазоне частот 10—200 *гц* при смещениях от 0,001 *мм* до 0,1 *мм*. Вместе с тем, обследованный диапазон представляет собой наибольший интерес для ряда практических задач, связанных с уменьшением шумоизлучения вибрирующих поверхностей.

Исследования вибропоглощающего эффекта различных материалов были начаты с измерения физико-механических параметров материалов типа изола. Этот материал, разработанный в последние годы во Всесоюзном научно-исследовательском институте «Асбестоцемент», состоит из резиновой крошки, разваренной для частичной девулканизации в мягчите-

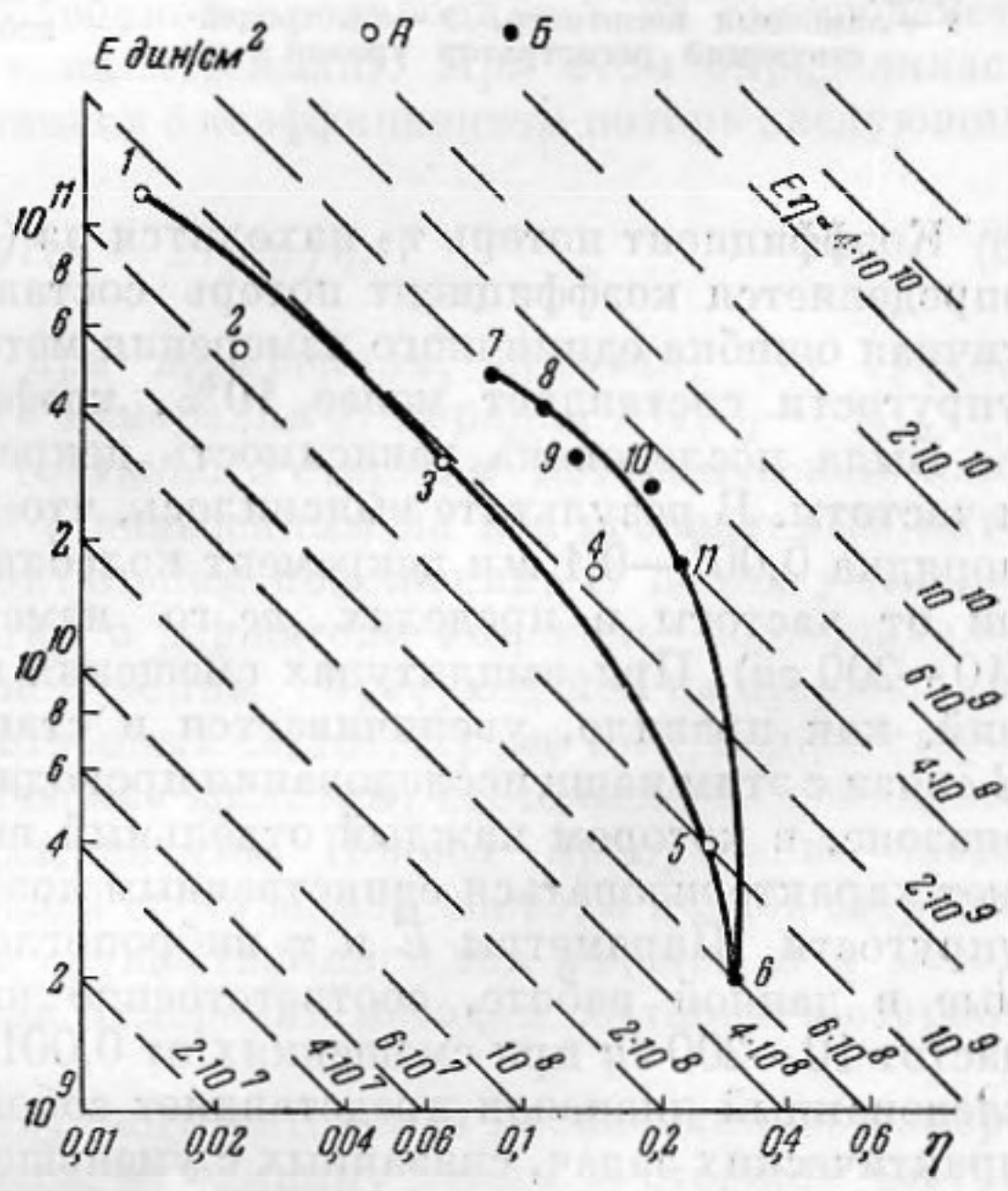
лях типа битума и кумароновой смолы. Процесс разваривания производится при температурах 160—170° без избыточного давления. После охлаждения до $t = 60—70°$ масса вальцуется, подвергаясь при этом дополнительной механической деструкции. При этом получается гладкая и эластичная пленка из почти однородной массы, напоминающая по своим свойствам каучук. В процессе исследования в состав изола вводились различные волокнистые наполнители: асбест, целлюлоза, кордная ткань, шлаковата и другие материалы.



Фиг. 4. Вибропоглощающие материалы из фетра и войлока: 1 — войлок, пропитанный мастикой изола и покрытый листовым изолом, 2 — фетр, пропитанный и покрытый мастикой изола на основе целлюлозы, 3 — войлок, пропитанный и покрытый мастикой изола на основе целлюлозы, 4 — войлок, пропитанный битумом и покрытый мастикой изола на асбестовой основе, 5 — войлок без пропитки, покрытый мастикой изола на основе целлюлозы, 6 — фетр без пропитки, покрытый мастикой изола на асбестовой основе, 7 — фетр, пропитанный мастикой изола на асбестовой основе, 8 — фетр, пропитанный бутимом и покрытый мастикой изола на асбестовой основе

На фиг. 3 приведены результаты измерений для этих образцов, полученные методом однородного стержня. На плоскости $E\eta$ каждая точка характеризует определенный материал. Пунктиром нанесены уровни мнимой части модуля упругости, т. е. произведений $\eta \cdot E$.

Если толщина вибропоглощающего покрытия не ограничивается, то, как уже указывалось выше, качество его определяется лишь величиной внутренних потерь; в этом случае лучшими следует считать материалы, обозначенные треугольником (изол с асбестовым волокном в ка-



Фиг. 5. Слоистые материалы с различным соотношением содержания изола и упругих прослоек: А — из алюминиевой фольги, Б — из кабельной бумаги. Процентное содержание упругих прослоек по толщине в процентах:

1 — 30; 2 — 7; 3 — 2; 4 — 1,5; 5 — 0,5; 6 — 0; 7 — 52; 8 — 28; 9 — 22; 10 — 17; 11 — 14,5

честве наполнителя) или квадратом (изол с текстильным волокном в качестве наполнителя). Если же толщина наносимого вибропоглощающего слоя должна быть относительно мала, качество материала оценивается произведением $\eta \cdot E$; в этом случае предпочтение следует отдать материалу, обозначенному крестиком (изол с целлюлозным волокном).

Для получения вибропоглощающих материалов с высокими внутренними потерями была изготовлена группа образцов, состоящих из фетра и войлока, пропитанных битумом или мастикой изола на асбестовой или целлюлозной основе. На фиг. 4 приведены результаты измерений методом составного стержня. Для сравнения там же даны параметры чистого фетра и войлока. Наибольшие внутренние потери получены при пропитке фетра битумом или мастикой изола на асбестовой основе (эти материалы обозначены треугольником и крестиком). К сожалению, эти материалы имеют низкий модуль упругости $\sim 10^9$ и могут эффективно снижать вибрации лишь при больших толщинах.

В целях получения материалов с повышенным произведением $\eta \cdot E$ были исследованы слоистые материалы, в которых мастика изола комбинировалась с упругими прослойками в виде кабельной бумаги и алюминиевой фольги. Была снята зависимость модуля упругости и коэффициента потерь материала в зависимости от процентного соотношения между общей толщиной упругих прослоек и общей толщиной мастики в слоистом образце. На фиг. 5 приведены результаты измерения параметров этих образцов методом составного стержня. Сплошными линиями соединены точки, соответствующие упругим прослойкам из одного и того же материала.

Процентное соотношение толщин мастики и упругих прослоек менялось для образцов с алюминиевой фольгой в пределах: $0\% \div 30\%$, для образцов с кабельной бумагой — $0 - 50\%$. Ход экспериментальной кривой указывает на существование потерь, обусловленных слоистостью материалов, природа которых нуждается в дополнительном выяснении.

Выводы

Среди исследованных материалов имеются образцы, характеризуемые коэффициентами затухания $\eta = 0{,}2 \div 0{,}4$ при величинах модулей упругости порядка 10^9. Эти материалы уже сейчас могут быть применены для уменьшения вибраций, распространяющихся по металлическим конструкциям. При необходимости ограничения веса вибропоглощающего материала целесообразно использовать слоистые материалы, характеризуемые наибольшим произведением $\eta \cdot E = 5 \cdot 10^9$. Следует отметить, как один из лучших вибропоглощающих материалов, фетр, пропитанный битумом и покрытый мастикой на асбестовой основе (фиг. 4). При величине коэффициента потерь $\eta = 2{,}5$ (логарифмический декремент затухания $d = \eta\pi > 8$) его модуль упругости $E = 10^9$ и $\eta \cdot E = 2{,}5 \cdot 10^9$, что позволяет считать этот материал достаточно приемлемым в целях вибропоглощения.

Дальнейшее изучение вибропоглощающих материалов должно сочетать феноменологическое исследование их динамических характеристик, (в частности частотных и амплитудных характеристик модуля упругости и коэффициента затухания) с изучением молекулярного механизма потерь механических колебаний. Необходимо также изучить способы рационального использования вибропоглощающего материала для уменьшения веса и толщины покрытия.

Авторы выражают глубокую благодарность Д. Д. Сурмели и Ч. Д. Марр за изготовление и предоставление большинства описанных в статье материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Д. Тартаковский. Вибропоглощающие материалы и их применение в технике. Отчет. Акуст. ин-т АН СССР, 1957.
2. H. Oberst. Die Dëmpfung der Biegeschwingungen dünner Bleche durch fest haftende Beläge. Akust. Beihefte, 1952, 4, 181—188.
3. Ф. Морз. Колебания и звук. М.— Л., ГИТТЛ, 1949.

Акустический институт АН СССР
Москва

Поступила в редакцию
20 мая 1958 г.