АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIV 1978 Вып. 6

УДК 628.517.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЪЕМНЫХ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Л. И. Метт, Б. Д. Тартаковский

Рассмотрены потери энергии в съемных покрытиях со слоем вибропоглощающего материала, рассчитан коэффициент потерь. Показано, что потери, обусловленные внутренним трением вязкоупругого слоя, значительно превышают потери из-за поверхностного трения и перетекания воздуха в микрополостях между слоями. Экспериментально определен коэффициент трения при знакопеременном скольжении. Приведены формулы для расчета точного и ориентировочного значений коэффициента потерь.

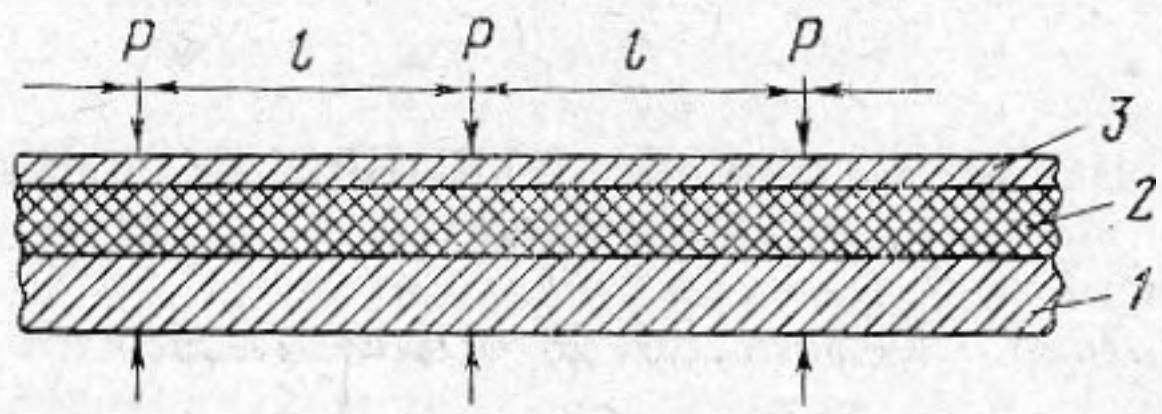
Одним из эффективных способов снижения производственного шума, возникающего при обработке листовых конструкций, является применение съемных вибропоглощающих покрытий (СВПП) [1]. Такие устройства состоят из одного или нескольких вибропоглощающих слоев, соединенных с демпфируемым металлическим листом заклепками, болтами, электромагнитными прижимами. Поэтому при изгибных колебаниях этих конструкций между контактирующими поверхностями может происходить некоторое проскальзывание.

В съемных вибропоглощающих покрытиях потери энергии при изгибных колебаниях могут определяться тремя механизмами: внутренним трением в материалах, внешним трением поверхностей и передвижением воздуха в микрополостях между слоями. Механизм потерь в какой-либо точке зависит от отношения в данный момент времени между силой трения покоя $F_п(y)$ и касательным напряжением в контактирующих поверхностях $\tau(y, t)$ [2]. Это напряжение изменяется в течение периода по абсолютной величине от нуля до максимального значения $|\tau_{max}(y)|$, определяющегося для каждой точки формой колебания демпфируемой конструкции.

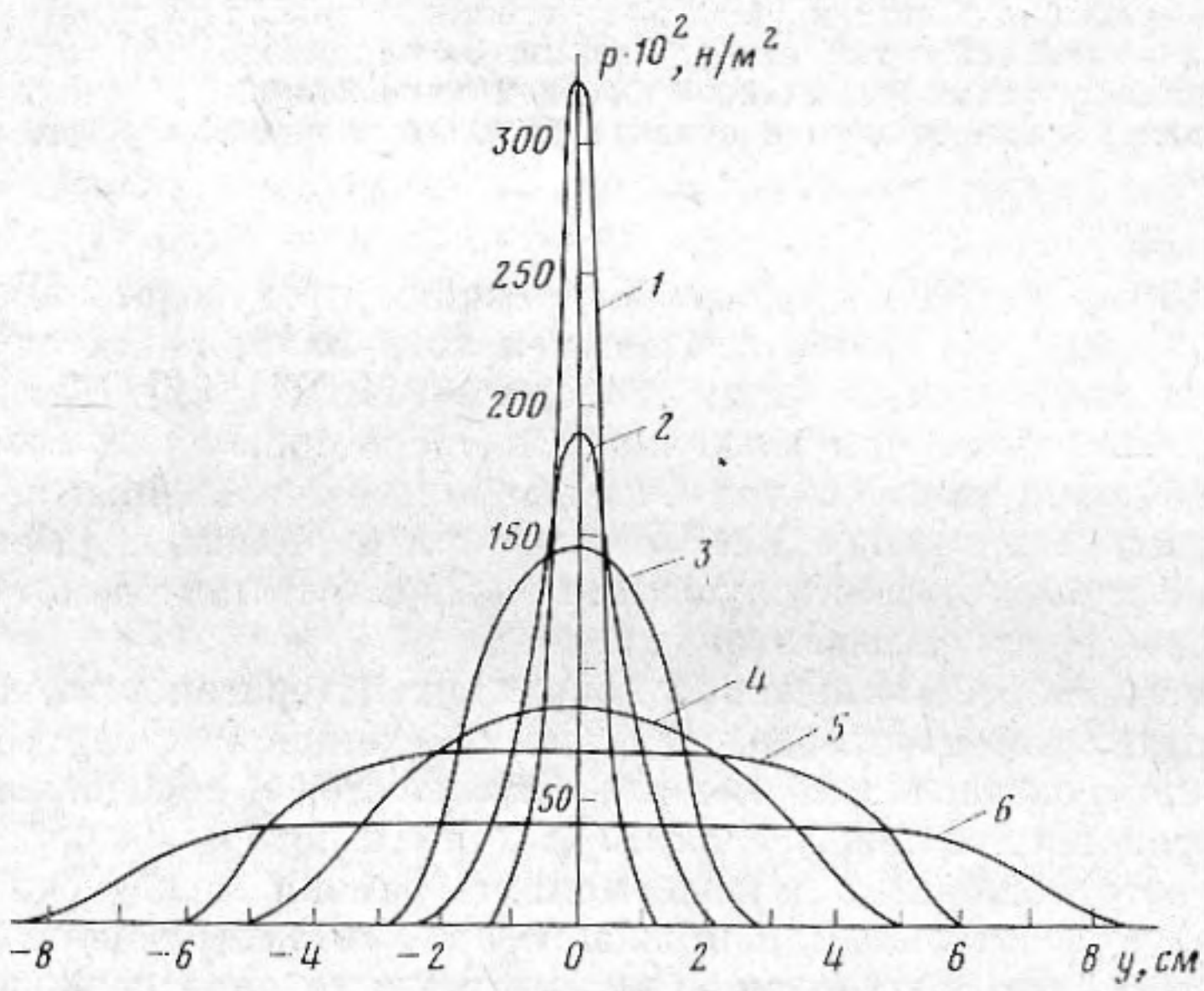
На тех участках, где $F_п$ больше максимального напряжения $\tau_{max}(y)$ во всех точках, проскальзывание невозможно, и механизм потерь такой же, как у конструкции с жестким контактом поверхностей слоев, т. е. потери определяются внутренним трением. Там, где $F_п$ меньше $\tau_{max}(y)$, потери происходят в течение части периода колебания из-за трения при знакопеременном скольжении. На этих участках энергия рассеивается и вследствие перетекания воздуха в микрополостях, образующихся между поверхностями из-за неравномерности прижатия слоев. Обычно эти потери невелики. Так, коэффициент потерь энергии в системе пластина — стержень, соединенных заклепками, при расстоянии между поверхностями $7{,}5\cdot10^{-2}$ *мм* имеет максимальное значение $\eta=0{,}01-0{,}02$ на частотах 1000—2000 *гц* при давлении воздуха 100—150 *мм* рт. ст. При атмосферном давлении значение коэффициента снижается, например, на этих же частотах до $\eta=0{,}006-0{,}007$ [3].

В исследованных нами съемных покрытиях вибропоглощающий материал прижимался к демпфируемому листу (стержню) тонкой по сравнению с ним однородной или ужесточенной пластиной (полосой) с помощью

электромагнитов и шпилек. Рассмотрим армированное покрытие с одним слоем вибропоглощающего материала, демпфирующее металлический стержень 1 (фиг. 1). К стержню шириной b и удельной поверхностной массой m прижат вибропоглощающий слой *2* переменным по длине стержня статическим давлением $p(y)$. Это давление передается армирующей полосой *3*, к которой приложены сосредоточенные силы P с шагом l. Толщину, модуль упругости и момент инерции площади поперечного сечения слоев обозначим h_i, E_i и I_i, где i — соответственно 1, 2, 3.



Фиг. 1. Схема стержня с СВПП. *1* — демпфируемый металлический стержень; *2* — вибропоглощающий материал; *3* — армирующая полоса



Фиг. 2. Эпюра статического давления. *1*, *3*, *5* — вибропоглощающая пластмасса толщиной 10 *мм*; *2*, *4*, *6* — монолитная твердая резина тип 1074 толщиной 5 *мм*; *1*, *2* — дюралевая прижимная полоса толщиной 2 *мм*; *3*, *4* — стальная прижимная полоса толщиной 3 *мм*; *5* и *6* — прижим осуществляется стальным уголком 30×30 *мм*

Когда при изгибе металлического стержня *1* его верхний поверхностный слой растягивается, нижний поверхностный слой вибропоглощающего материала сжимается. И наоборот, когда сжимается слой металла, растягивается прилегающий слой вибропоглощающего материала. Относительное движение поверхностей имеет периодический характер с частотой изгибных колебаний стержня f ($F_п < \tau_{max}$).

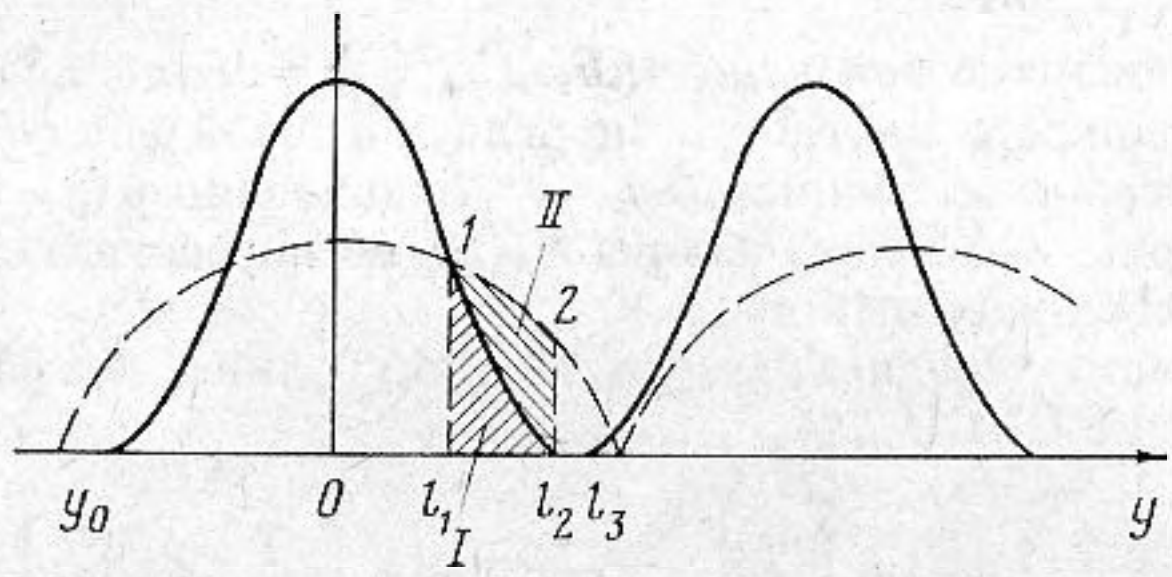
Сила $F_п$, равная $f_п p(y)$, где $f_п$ — коэффициент трения покоя, определяется для каждой точки стержня эпюрой распределения давления $p(y)$. Определим функцию $p(y)$. Пренебрегая сжатием слоя *2*, создаваемым стержнем 1, представим армирующую полосу *3*, прижатую к слою *2*, балкой на упругом основании. Погрешность при этом не превышает 3%, если $h_2^3 E_2 / h_1^3 E_1 < 3{,}7 \cdot 10^{-2}$ [4]. Так как обычно толщины $h_1 \leqslant 0{,}08$—$0{,}01$ *м* и

$h_2 \leqslant 0{,}02$ *м*, а отношение модулей упругости $E_2/E_1 \approx 10^{-4} \div 10^{-2}$, то неравенство [4] для съемных вибропоглощающих покрытий соблюдается.

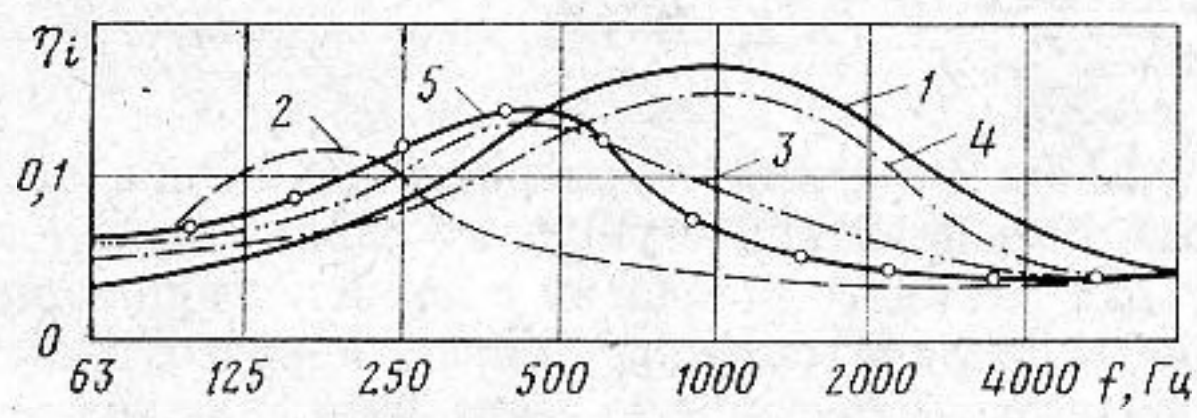
Таким образом, давление в слое *2* можно определить соотношением $p(y) = E_2 W(y)$, где $W(y)$ — упругая линия бесконечной балки на упругом основании, нагруженной сосредоточенной силой P, уравнение которой [5]

$$W(y) = \frac{Pe^{-\alpha y}}{8\alpha^3 E_3 I_3} (\cos \alpha y + \sin \alpha y).$$

Давление в слое *2* можно записать в виде $p(y) = p_0 \Phi(\alpha y)$, где $p_0 = PE_2/8\alpha^3 E_3 I_3 h_2$ — давление в точке приложения силы $(y=0)$; $\Phi(\alpha y) = e^{-\alpha y}(\cos \alpha y + \sin \alpha y)$; $\alpha = (E_2 b/4h_2 E_3 I_3)^{1/4}$.



Фиг. 3. Определение границ расчетных участков стержня с СВПП



Фиг. 4. Зависимость коэффициента потерь в стержне с СВПП от шага прижимов. *1* — клееный стержень; *2*–*5* — шаг l соответственно 20; 10; 5 и 2,5 *см*

На фиг. 2 показаны эпюры распределения давления $p(y)$ для некоторых исследованных съемных покрытий, соответствующие сосредоточенной силе $P=10$ Н. Очевидно, что изменение силы P отражается на эпюре распределения давления $p(y)$ пропорциональным изменением масштаба на оси ординат.

Точки пересечения эпюры распределения силы $F_п(y) = f_п p_0 \Phi(\alpha y)$ (кривая *1* фиг. 3) с осью абсцисс и эпюрой $|\tau_{max}(y)| = |\overset{0}{\tau}_{max} \sin \times [2\pi(y-y_0)/\lambda_и]|$ (кривая *2*) определяют границы l_1, l_2, l_3 и т. д. расчетных участков, на которые может быть условно разделен стержень с СВПП при установившейся в нем стоячей волне. Здесь $\overset{0}{\tau}_{max} = 2\pi^3 E_2 h_2^2 z_0/\lambda_и^3$ — амплитудное значение $\tau_{max}(y)$; y_0, $\lambda_и$ и z_0 — соответственно абсцисса узла, длина волны и амплитуда изгибных колебаний в стержне.

На участке Ol_1 сила трения $F_п(y)$ больше напряжения $|\tau_{max}(y)|$, и коэффициент потерь $\eta = \eta_{пл+п}$, где $\eta_{пл+п}$ — коэффициент потерь армированного вибропоглощающего покрытия с жестким закреплением слоев, например, клееного [6].

На участке $l_1 l_2$ в течение той части периода колебаний, когда $\tau(y,t) < F_п$, потери определяются внутренним трением, и коэффициент потерь равен $\eta_{пл+п}$ (зона I фиг. 3); когда же $\tau(y, t) > F_п$, потери энергии связаны в основном с трением скольжения (зона II). Коэффициент потерь в точ-

ке y на этом участке

$$\eta_{l_1 l_2}(y) = \frac{2}{T}\left[\eta_{\text{пл+п}} t_1 + \eta_{\text{с}}\left(\frac{T}{2} - t_1\right)\right],$$

где $t_1(y) = \frac{T}{2\pi}\operatorname{Arcsin}\frac{f_{\text{п}} p_0 \Phi(\alpha y)}{\tau^0_{\max}\sin[2\pi(y-y_0)/\lambda_{\text{и}}]}$ соответствует моменту времени, когда $\tau(y, t) = F_{\text{п}}(y)$; $\eta_{\text{с}}(y)$ — коэффициент потерь энергии при работе силы трения скольжения $F_{\text{с}}$, равный $\Delta W_{\text{с}}/\pi W$. Здесь $\Delta W_{\text{с}} = \int\limits_{t_1}^{T/2} F_{\text{с}}\frac{\partial s}{\partial t}dt$; $s(y, t) = s_{\max}\sin\frac{2\pi(y-y_0)}{\lambda_{\text{и}}}\sin\omega t$ — относительное перемещение точек контактирующих поверхностей; $s_{\max} = \pi h_1 z_0/\lambda_{\text{и}}$; $W = 0{,}5 m\omega^2 z_0^2$ — полная колебательная энергия или плотность энергии изгибной волны; $\omega = 2\pi f$.

В точках стержня с абсциссой $l_2 < y < l_3$ давление $p(y)$ близко к нулю, если шаг l выбран так, чтобы эпюры $F_{\text{п}}(y)$ не пересекались. Здесь потери могут приниматься равными нулю.

Таким образом, усредненный на единицу длины коэффициент потерь энергии стержня с СВПП

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{2}{l}\left[\eta_{\text{пл+п}}\int\limits_0^{\lambda_{\text{и}}/4} l_1 dy_0 + \frac{2}{T}\eta_{\text{пл+п}}\int\limits_0^{\lambda_{\text{и}}/4}\int\limits_{l_1}^{l_2} t_1 dy dy_0\right] + \frac{4F_{\text{с}} s_{\max} f_{\text{п}} p_0}{\pi W l \tau^0_{\max}}\int\limits_{l_1}^{l_2}\Phi(\alpha y)dy. \tag{1}$$

Первое слагаемое выражения (1) определяет потери энергии, обусловленные внутренним трением вязко-упругого слоя, второе — трением скольжения. Поэтому для съемного покрытия с вибропоглощающим материалом второе слагаемое на два-три порядка меньше первого, и им можно пренебречь; это можно объяснить тем, что из-за малых модулей упругости вибропоглощающих материалов для захвата их поверхностного слоя и обеспечения деформации сдвига достаточны весьма небольшие силы трения покоя и соответственно величины нормального давления, а при малых давлениях мала сила знакопеременного трения. Например, максимально возможные коэффициенты потерь, обусловленные внутренним трением и трением скольжения стального стержня шириной 30 *мм* и толщиной 10 *мм*, задемпфированного полосой пластмассы толщиной 9 *мм*, прижатой стальной полосой толщиной 3 *мм*, составляют в диапазоне звуковых частот соответственно 0,1 и 0,001.

Отношение усредненного коэффициента $\eta_{\text{ср}}$ к максимальному $\eta_{\text{пл+п}}$ характеризуется величиной

$$\gamma = \frac{\eta_{\text{ср}}}{\eta_{\text{пл+п}}} = \frac{2}{l}\int\limits_0^{\lambda_{\text{и}}/4} l_1 dy_0 + \frac{4}{lT}\int\limits_0^{\lambda_{\text{и}}/4}\int\limits_{l_1}^{l_2} t_1 dy dy_0, \tag{2}$$

которая может быть определена для конкретного покрытия графическим методом.

Для ориентировочной оценки γ линеаризуем функцию $\Phi(\alpha y)$, заменим модуль напряжения $|\tau_{\max}(y)|$ его эффективным значением и ограничимся первым членом разложения функции Arc sin в степенной ряд. Таким образом,

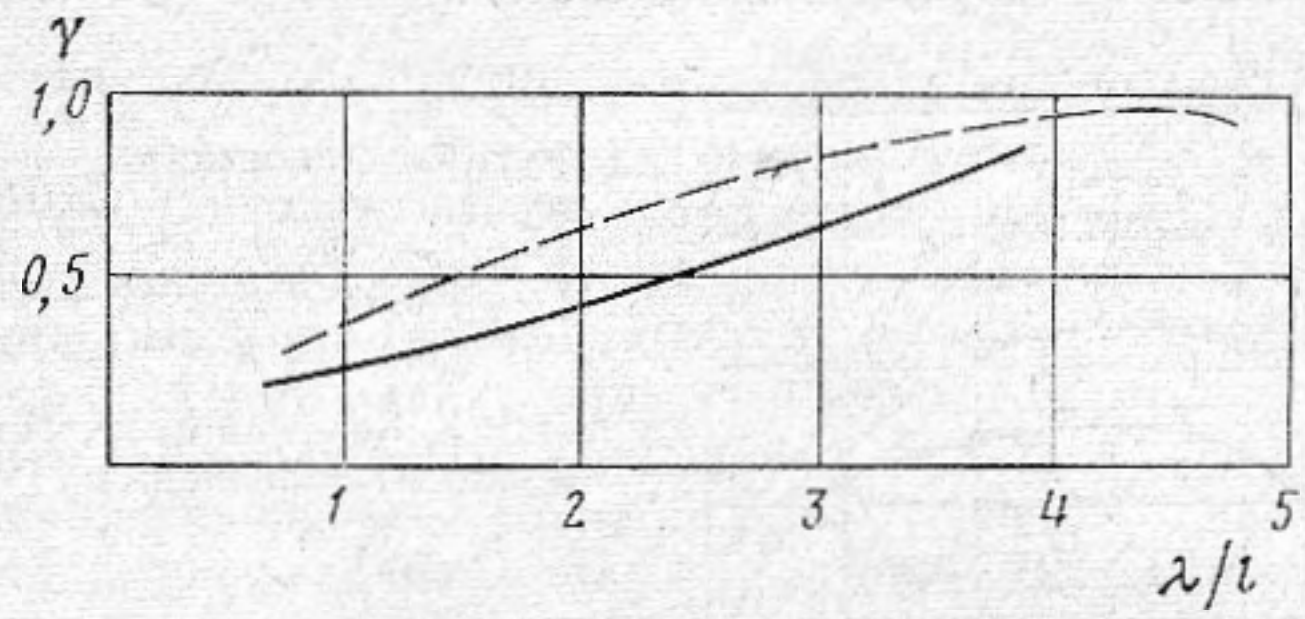
$$\gamma \approx \frac{1}{l\alpha}\left(3{,}85 - 2{,}10\frac{\tau^0_{\max}}{f_{\text{п}} p_0}\right). \tag{3}$$

После подстановки в (3) значений α, τ^0_{max} и p_0 получим

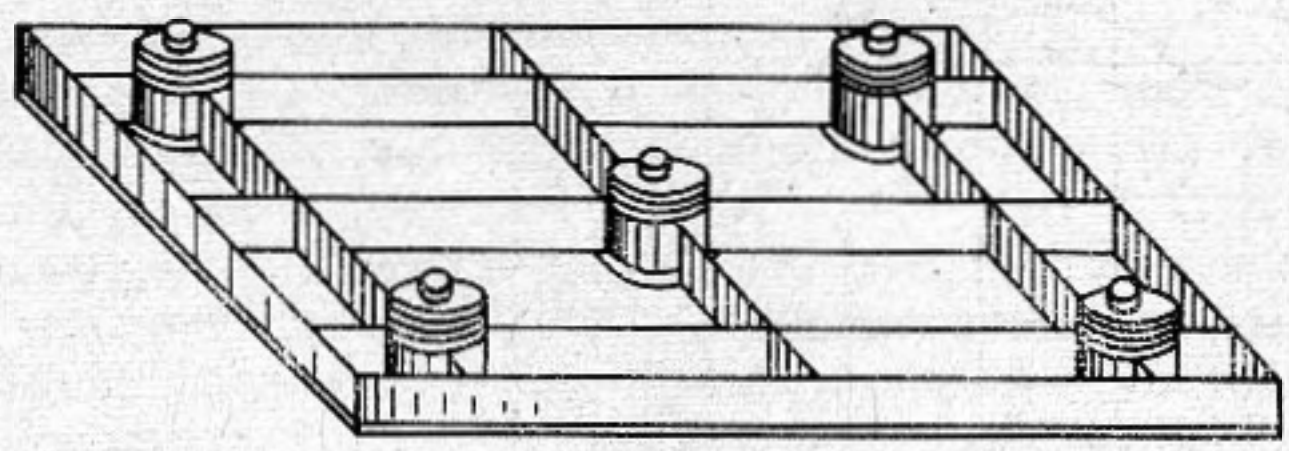
$$\gamma \approx \frac{1}{l}\left[5{,}4\left(\frac{h_2}{E_2 b}E_3 I_3\right)^{1/4} - 173\frac{z_0}{f_п P \lambda_и^3}(h_2^5 b E_2 E_3 I_3)^{1/2}\right]. \quad (4)$$

Погрешность оценки γ по этой формуле в сравнении с (2) не превышает $20 \div 25\%$, если шаг $l > \lambda_и/3$.

При разработке и проектировании съемных покрытий максимальное значение γ, равное единице, не может обеспечиваться варьированием всех



Фиг. 5. Относительный коэффициент потерь энергии
1 – расчет; *2* – эксперимент

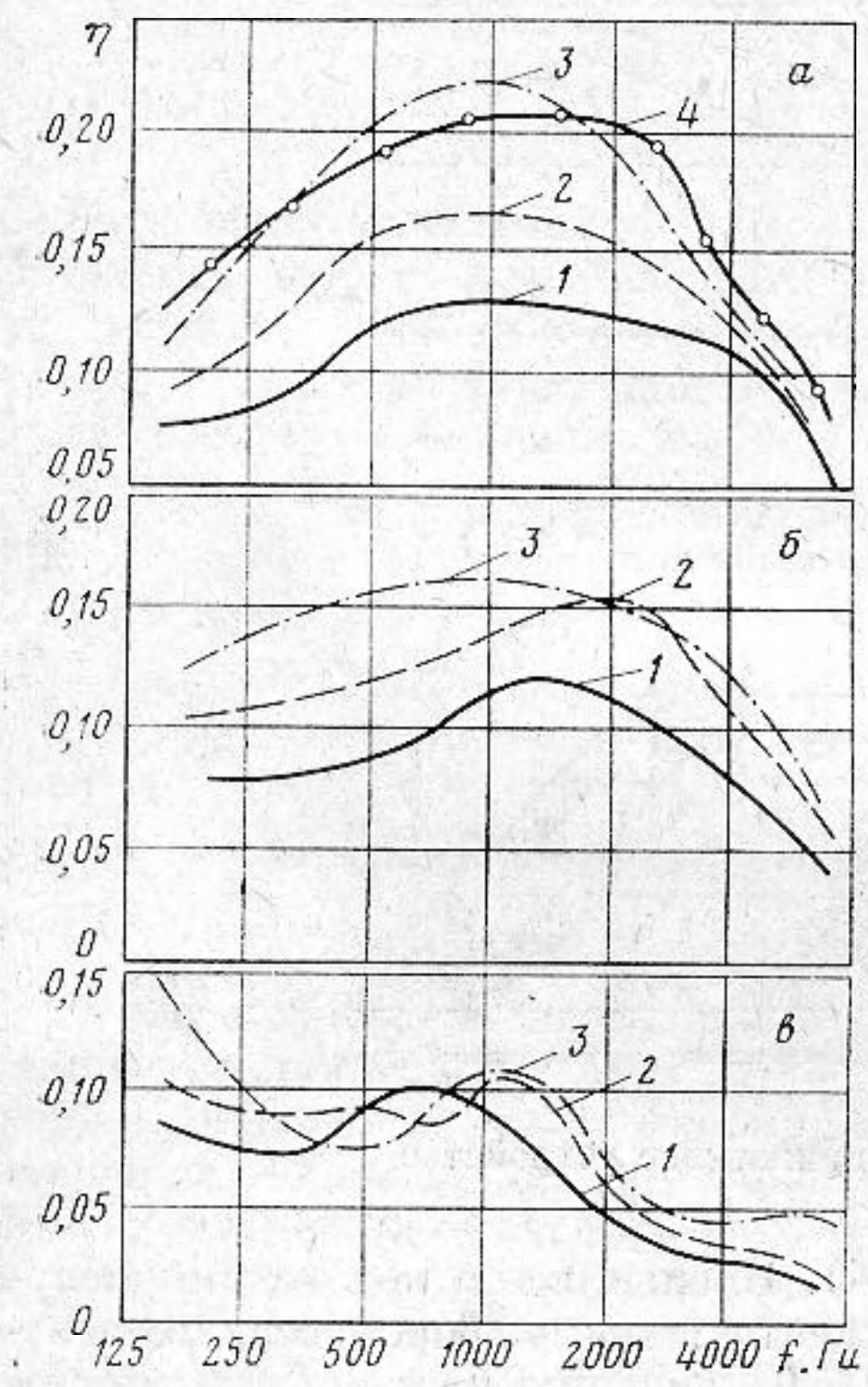


Фиг. 6. Электромагнитное прижимное устройство

параметров, входящих в выражение (4). Прежде всего необходимо получить значительную величину коэффициента $\eta_{пл+п}$ подбором величины изгибной жесткости прижимной полосы $E_2 I_3$, толщины h_2 и модуля упругости вязко-упругого материала E_2. Поэтому для повышения эффективности съемного покрытия следует выбирать максимально возможные величины коэффициента трения $f_п$ и силы прижима P, одновременно уменьшая шаг l. Однако чрезмерное увеличение силы P и уменьшение шага l может затруднить деформацию сдвига в слое *2* и привести к значительному снижению коэффициента потерь $\eta_{пл+п}$.

Влияние этих параметров на эффективность съемных покрытий оценивалось экспериментально по изменению коэффициента потерь $\eta_{ср}$ (определяемого по ширине резонансной характеристики измеряемых образцов стержней с СВПП). Влияние шага l на коэффициент потерь определялось на стальных стержнях с размерами 1,2×0,03×0,01 и 1,2×0,03×0,006 *м*. Вибропоглощающие материалы прижимались с одной стороны стержня армирующей полосой с помощью резьбовых соединений. Шаг между шпильками от опыта к опыту уменьшался от 40 до 2,5 *см*. Коэффициент потерь η_c стального стержня толщиной 6 *мм* со съемным вибропоглощающим покрытием из пластмассы толщиной 9 *мм* при уменьшении шага между шпильками вначале увеличивается во всем диапазоне частот (кривые *2–4* фиг 4) и достигает значений коэффициента потерь $\eta_{пл+п}$ (кривая *1*). При дальнейшем уменьшении шага коэффициент потерь снижается (кривая *5*), так как начинает сказываться дополнительная жесткость резьбовых соединений, препятствующая деформации сдвига в вибро-

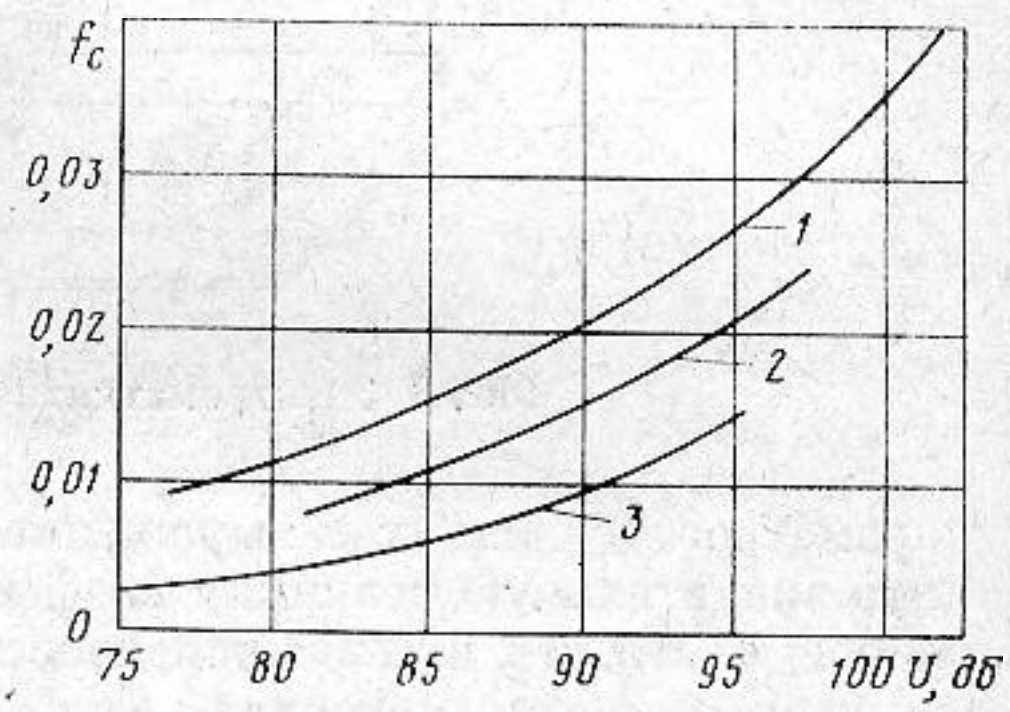
поглощающем слое. Некоторую роль в снижении потерь играет и уменьшение площади вибропоглощающего слоя. Частотная характеристика коэффициента потерь в стержне со съемным покрытием имеет максимум, свойственный армированным покрытиям. Величина максимального коэффициента потерь с уменьшением шага крепления возрастает и сдвигается в сторону более высоких частот до тех пор, пока не становится идентичной частотной характеристике коэффициента потерь стержня с жестким креплением слоев. При дальнейшем уменьшении шага максимум потерь уменьшается и сдвигается в сторону низких частот.



Фиг. 7

Фиг. 7. Зависимость коэффициента потерь в пластине с СВПП от давления. *а* – пластмасса, *б* – резина, *в* – войлок. *1* – $p=0{,}8\cdot10^3$ *Н/м*²; *2* – $1{,}3\cdot10^3$; *3* – $1{,}8\cdot10^3$ и *4* – $2{,}1\cdot10^3$

Фиг. 8. Коэффициент трения знакопеременного скольжения. *1* – $p=600$ *Н/м*²; *2* – 1200; *3* – 2400



Фиг. 8

Усредненные результаты этого эксперимента позволили представить зависимость величины γ от шага l, выраженного в долях длины изгибной волны $\lambda_и$ (кривая *2* фиг. 5). Оптимальному значению γ соответствует $l\approx\lambda_и/4\div\lambda/5$. Здесь же показан расчет по (2) зависимости γ от $\lambda_и/l$ (кривая *1*).

Влияние силы прижима вибропоглощающего материала на коэффициент потерь съемного покрытия определялось следующим образом. Вибропоглощающий листовой материал прижимался рамкой размером 0,5×0,5 *м* с пятью электромагнитами постоянного тока (фиг. 6), причем зазор $\delta_{ср}$ между торцами электромагнитов и поверхностью демпфируемого стального листа регулировался так, чтобы при включении тока сила электромагнитов была достаточной для прижатия вибропоглощающего материала и одновременного замыкания цепи магнитопровода. Усредненные значения коэффициента потерь съемного покрытия η_c, измеренного в ряде точек пластины при различном усредненном по площади давлении p, показаны на фиг. 7. Для пластмассы толщиной 9 *мм* (фиг. 7, *а*) и монолитных твердых резин толщиной 4,5 *мм* (фиг. 7, *б*) оптимальным оказалось

давление $p=2\cdot10^3$ $Н/м^2$ и зазор $\delta_{ср}=1$ *мм*, а для плотного войлока толщиной 1,5 *мм* — давление $p=10^3$ $Н/м^2$ и зазор $\delta_{ср}=2$ *мм* (фиг. 7, *в*).

Таким образом, нормальное давление p, необходимое для достижения эффективности съемных покрытий, достаточной для практических целей, оказалось значительно ниже давлений, которые могли бы затруднить деформацию сдвига вибропоглощающих материалов.

Сила трения знакопеременного скольжения определялась через разность между потерями энергии в системе за период колебаний до и после внесения потерь, связанных с поверхностным трением. Удельная сила трения знакопеременного скольжения $F_c=\pi m(\eta_2 v_{2ср}^2-\eta_1 v_{1ср}^2)/8a_{ср}S$, где S — площадь, перекрываемая трущимися поверхностями; $4a_{ср}=l_0$ — путь силы трения за один период; m — масса стержня; $a_{ср}$ — средняя амплитуда относительного смещения точек поверхностей материалов; η — коэффициент потерь энергии; $v_{ср}$ — средняя относительная колебательная скорость точек поверхностей материалов пары. Индексы 1, 2 относятся к системе соответственно до и после внесения трения.

Коэффициент кулонового трения f_c оказался почти пропорциональным колебательной скорости скольжения v, дб (фиг. 8). Такая зависимость между трением и скоростью характерна, как известно, для трения вязкой жидкости. Коэффициенты трения не превышали значений 0,04. При знакопеременном скольжении коэффициенты трения увеличиваются с ростом колебательной скорости, тогда как при трении поступательного движения влияние вибраций (при малых колебательных скоростях) незаметно [7]. Лишь при достижении значений колебательной скорости, сопоставимых со скоростью движения, влияние вибрации проявляется в уменьшении коэффициента трения. Кроме того, коэффициенты трения поступательного движения на порядок больше коэффициентов трения знакопеременного скольжения (не превышающих в наших опытах значений 0,04).

Существенное различие между трением при поступательном и знакопеременном движении можно объяснить тем, что при равномерном поступательном движении поверхность одного тела всеми своими неровностями перемещается по неровности поверхности другого тела, а при знакопеременном скольжении со звуковой частотой (когда максимальные смещения, составляющие в наших опытах 0,01—1,0 *мкм*, значительно меньше размеров микрорельефа поверхностей) выступы одной поверхности постоянно находятся во впадинах или на вершинах другой поверхности. Трение в этом случае представляет собой некоторое смещение выступов одного материала выступами другого. Затраты энергии на такую деформацию намного меньше, чем при поступательном движении одного тела вдоль другого, сопровождаемого значительной деформацией вплоть до разрушения поверхностного слоя.

Результаты изложенных выше исследований свойств съемных покрытий позволили разработать ряд съемных вибропоглощающих и шумоснижающих устройств: постель для вырубки корня сварного шва [8], стенд для снижения шума при обработке секций, шумоснижающий кондуктор для снижения шума при креплении набора к бортам и днищам малых судов с помощью заклепочных соединений и другие съемные устройства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Тартаковский Б. Д., Метт Л. И., Климов В. Г.* Съемные вибропоглощающие устройства. Технология судостроения, 1972, 4, 9—12.
2. *Лебедева В. И.* Оптимальное демпфирование в двухслойной консоли при произвольной периодической нагрузке. В сб. Вопросы динамики и прочности, вып. XI, Изд-во АН ЛатвССР, 1964, стр. 147—158.
3. *Maidanik G.* Energy dissipation associated with gaspumping in structural joints. JASA, 1966, *40*, 5, 1064—1072.
4. *Архангородский А. Г., Розендент Б. Я.* Трехслойные конструкции в судостроении и судоремонте. Калининградское кн. изд-во, 1968.

5. *Короткин Я. И., Локшин А. З., Сиверс Н. Л.* Изгиб и устойчивость стержней и стержневых систем. М., Машгиз, 1953.
6. *Никифоров А. С., Будрин С. В.* Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. Л., «Судостроение», 1968.
7. *Иокояма И., Окабе С., Ишикава К.* Снижение кинетического трения путем приложения различно направленных гармонических колебаний. Экспресс-информация ВИНИТИ, серия «Детали машин», М., 1971, вып. 24, реф. 99.
8. *Гриневич Е. Н., Климов В. Г., Метт Л. И., Тартаковский Б. Д.* Постель для сборки корпуса мелкого судна. Авт. свид. № 299401 от 13 января 1971 г. Бюл. изобр. № 12, 1971 г.

Поступила
24 мая 1977 г.
После исправления
20 февраля 1978 г.