АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXXI 1985 Вып. 5

УДК 534.833

# СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДЕМПФИРОВАНИЯ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИНЫ ОДНОСЛОЙНЫМ И АРМИРОВАННЫМ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ

*Наумкина Н. И., Тартаковский Б. Д.*

Обсуждаются результаты расчета эффективности демпфирования изгибных колебаний пластины различными типами вибропоглощающих покрытий. Эффективность покрытий оценивается по снижению величины среднего по площади пластины квадрата виброскорости пластины при нанесении покрытий.

К настоящему времени из всех известных типов вибропоглощающих покрытий наибольшее распространение получили однослойные покрытия, представляющие собой слой достаточно жесткого материала с большими механическими потерями, нанесенный непосредственно на демпфируемую поверхность. Это обусловлено простотой нанесения покрытия на демпфируемую поверхность и малой зависимостью его вибропоглощающих свойств от частоты.

Однако наиболее высокие механические потери в вязкоупругом материале, являющемся основой вибропоглощающих покрытий, возникают при сдвиговых деформациях материала, которые в однослойном покрытии невелики. В армированных вибропоглощающих покрытиях, в которых вязкоупругий материал находится между двумя жесткими на растяжение пластинами, сдвиговые деформации достигают бóльших значений. В результате при использовании армированных покрытий можно достичь существенно большего повышения потерь вибрационной энергии в демпфируемой конструкции, чем при использовании однослойного покрытия. Недостатком армированного покрытия является экстремальный характер частотной зависимости его коэффициента потерь, вследствие чего покрытие обладает высокими вибропоглощающими свойствами в ограниченной области частот.

Представляет интерес сравнение эффективности этих двух типов вибропоглощающих покрытий. Проведенное ранее сравнение [1] показало, что однослойное покрытие эффективнее армированного при весе покрытия, превышающем 20% от веса демпфируемой стальной пластины. Указанное сравнение эффективности покрытий было проведено по величине коэффициента потерь вибрационной энергии в металлической пластине, с одной стороны которой нанесено вибропоглощающее покрытие. При этом коэффициент потерь пластины с однослойным покрытием рассчитывался по приближенной формуле (1), дающей существенно завышенные значения при толщине покрытия, превышающей толщину демпфируемой пластины (см. фиг. 1):

$$\eta_\Sigma \simeq 14\eta_2 \frac{E_2}{E_1}\left(\frac{H_2}{H_1}\right)^2, \tag{1}$$

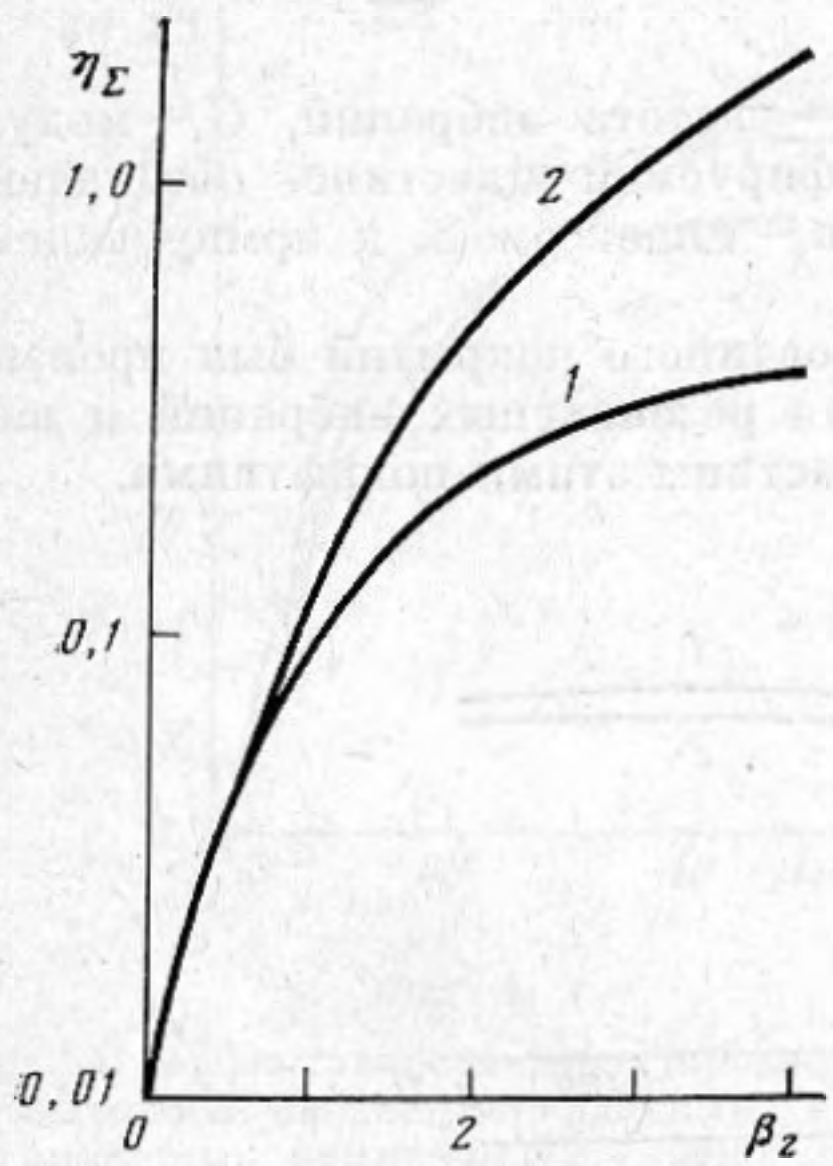
где $\eta_\Sigma$ — коэффициент потерь пластины с покрытием, $\eta_2$ — коэффициент потерь материала покрытия, $E_{1,2}$ и $H_{1,2}$ — модуль Юнга и толщина демпфируемой пластины (индекс 1) и покрытия (индекс 2). Эффективность же армированного покрытия оценивалась по максимальной величине коэффициента потерь пластины с покрытием без учета его резко выраженной зависимости от частоты (см. фиг. 2).

Однако эффективность вибропоглощающих покрытий определяется не только повышением коэффициента потерь вибрационной энергии в демп-

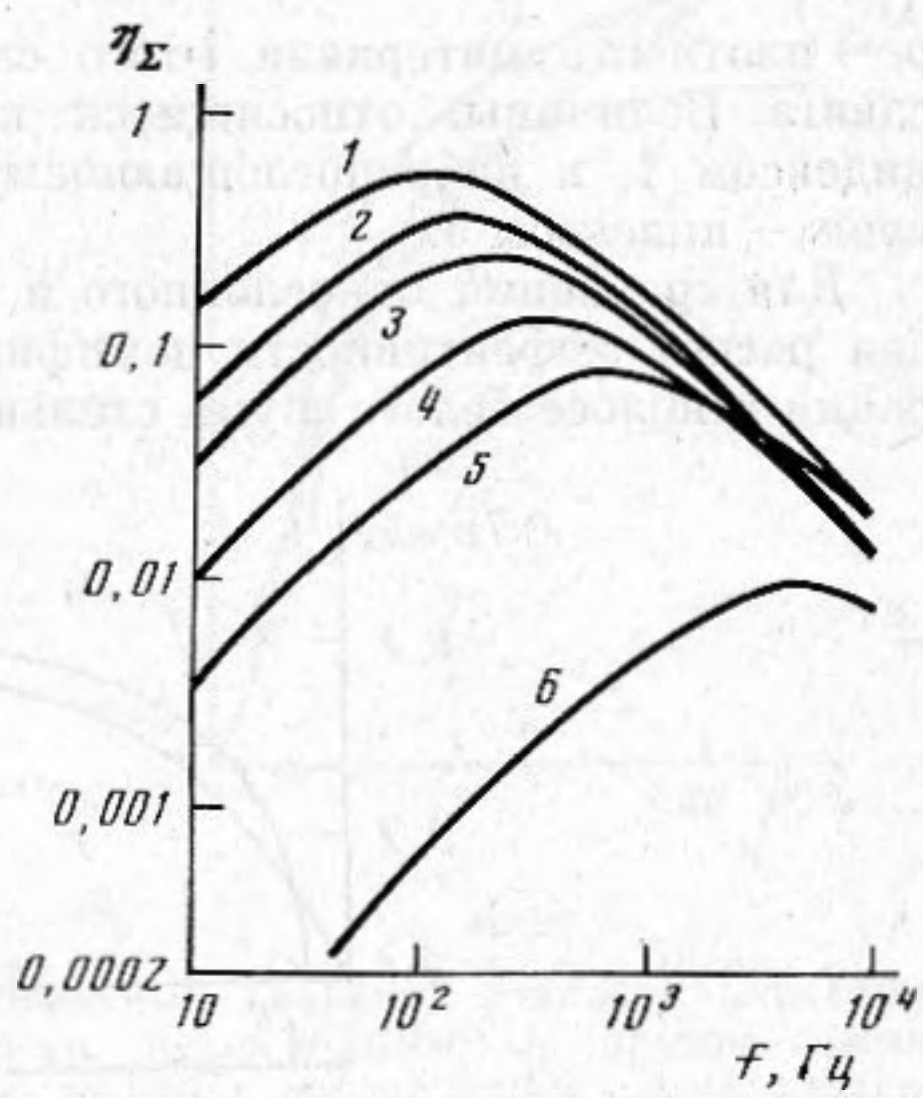
фируемой пластине при нанесении на нее покрытия, но также происходящими при этом изменениями ее изгибной жесткости и массы. Поэтому целесообразно провести сравнение эффективности однослойного и армированного вибропоглощающих покрытий по величине снижения уровня среднего по площади пластины квадрата виброскорости, которая определяется коэффициентом потерь, изгибной жесткостью и массой пластины [2]:

$$\text{ЭП (дБ)} = 10 \lg \frac{\langle v_0^2 \rangle}{\langle v_\Sigma^2 \rangle} = P \lg \frac{\eta_\Sigma}{\eta_0} + M \lg \frac{m_\Sigma}{m_0} + N \lg \frac{B_\Sigma}{B_0}, \qquad (2)$$

где ЭП (дБ) — эффективность покрытия, выраженная в децибелах, $\langle v^2 \rangle$ — средний по площади пластины квадрат виброскорости, $\eta$ — коэффициент потерь вибрационной энергии, $m$ — масса единицы площади, $B$ —




Фиг. 1




Фиг. 2

Фиг. 1. Коэффициент потерь стальной пластины с однослойным покрытием, рассчитанный по точной — *1* и приближенной — *2* формулам

Фиг. 2. Частотные характеристики коэффициента потерь стальной пластины с армированным покрытием при разных относительных весах покрытия $\mu$=(вес покрытия/вес пластины)·100%. *1* — $\mu$=63%, *2* — $\mu$=29, *3* — $\mu$=21, *4* — $\mu$=16, *5* — $\mu$=14,5, *6* — $\mu$=13%

изгибная жесткость. Параметры с индексом 0 относятся к недемпфированной пластине, с индексом $\Sigma$ — к пластине с вибропоглощающим покрытием. Коэффициенты $P$, $M$ и $N$ зависят от режима возбуждения вибраций в пластине: при возбуждении постоянной силой в режиме резонансных колебаний $P$=20, $M$=10 и $N$=10, а в полосе белого шума $P$=10, $M$=15 и $N$=5.

Для пластины с однослойным покрытием коэффициент потерь $\eta_\Sigma$ и изгибная жесткость $B_\Sigma$ рассчитываются по формулам [3]:

$$\eta_\Sigma = \eta_2 \frac{\alpha_2\beta_2}{1+\alpha_2\beta_2} \cdot \frac{3 + 6\beta_2 + 4\beta_2^2 + 2\alpha_2\beta_2^3 + \alpha_2^2\beta_2^4}{1 + 2\alpha_2(2\beta_2 + 3\beta_2^2 + 2\beta_2^3) + \alpha_2^2\beta_2^4},$$

$$\frac{B_\Sigma}{B_1} = \frac{1 + 2\alpha_2(2\beta_2 + 3\beta_2^2 + 2\beta_2^3) + \alpha_2^2\beta_2^4}{1+\alpha_2\beta_2},$$

где $\beta_2 = H_2/H_1$ и $\alpha_2 = E_2/E_1$.

Соответствующие параметры для пластины с армированным покрытием рассчитываются по формулам [4]:

$$\eta_\Sigma = \frac{\eta_2 \gamma g}{(1+g)^2 + g^2\eta_2^2 + \gamma g\,[1 + g\,(1+\eta_2^2)]},$$

$$\frac{B_\Sigma}{B_1} = \left\{1 + \alpha_2\beta_2\,(\beta_2^2 + 12\beta_{21}^2) + \alpha_3\beta_3\left[\beta_3^2 + \frac{12g\beta_{31}^2}{1+g\,(1+\alpha_3\beta_3)}\right] - \right.$$

$$\left. - \beta_2\beta_{31}\alpha_2\frac{6\beta_{21} + \beta_2 + 24g\beta_3\beta_{21}\alpha_3}{1+g\,(1+\alpha_3\beta_3)}\right\},$$

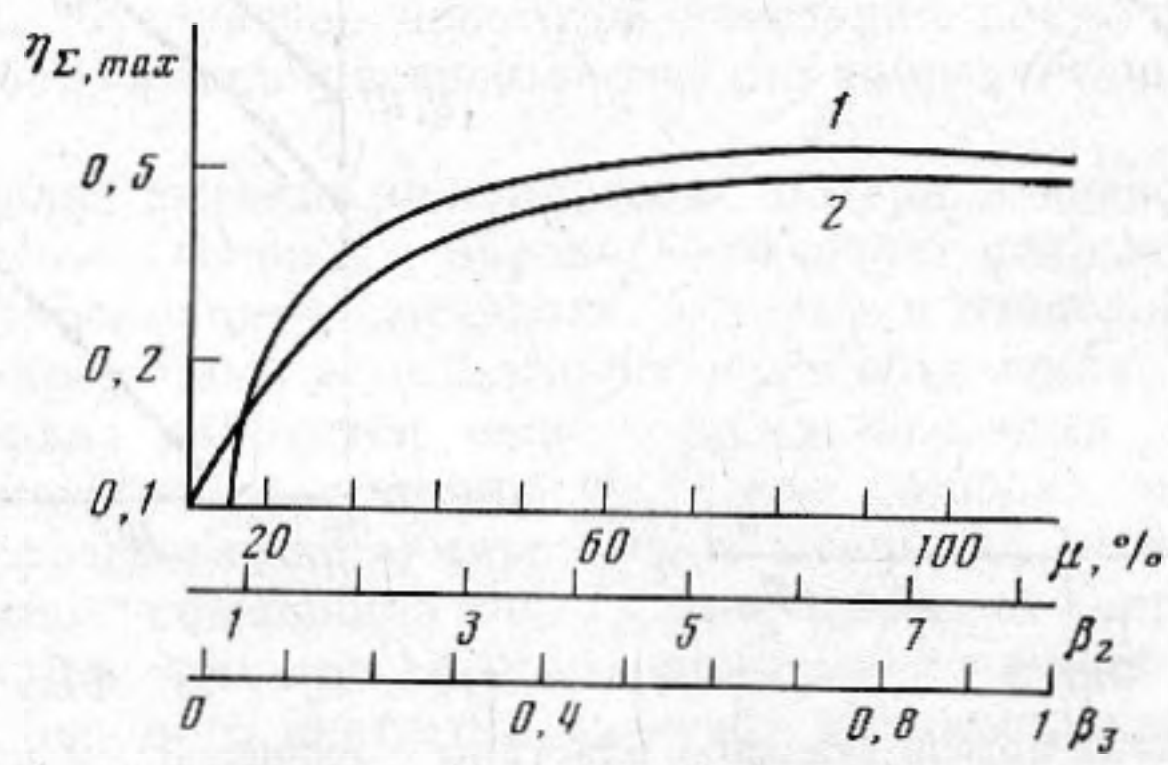
где

$$g = \frac{G_2}{E_3H_3H_2\omega}\left(\frac{B_\Sigma}{m_\Sigma}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad \gamma = 12\beta_{31}^2\beta_3\alpha_3, \quad \beta_3 = H_3/H_1, \ \omega = 2\pi f,$$

$$\beta_{21} = 0{,}5\,(1+\beta_2), \beta_{31} = 0{,}5\,(1+\beta_3) + \beta_2, m_\Sigma = \sum_{i=1}^{3}\rho_i H_i,$$

$\rho_i$ — плотность материала $i$-того слоя, $f$ — частота вибраций, $G$ — модуль сдвига. Величины, относящиеся к демпфируемой пластине, обозначены индексом 1, к вибропоглощающему слою — индексом 2, к армирующему слою — индексом 3.

Для сравнения однослойного и армированного покрытий был произведен расчет эффективности демпфирования резонансных вибраций и вибраций в полосе белого шума стальной пластины этими покрытиями.




Фиг. 3. Зависимость коэффициента потерь стальной пластины с армированным покрытием от толщин вибропоглощающего и армирующего слоев. *1* — $\beta_2=1$, *2* — $\beta_3=5\cdot10^{-2}$

Лучшими из опубликованных в литературе материалов для жесткого однослойного покрытия являются материалы, характеризующиеся следующими параметрами [5—7]: модуль Юнга $E_2=4\cdot10^9$ Па, коэффициент потерь $\eta_2=0{,}5$, плотность $\rho_2=1{,}6$ г/см$^3$.

В наиболее распространенных в настоящее время армированных вибропоглощающих покрытиях в качестве демпфирующего слоя используются резины или резиноподобные пластмассы, причем толщина демпфирующего слоя в этих покрытиях сравнима с толщиной демпфируемого металла [5, 8, 9]. Наилучшие из используемых резиноподобных материалов характеризуются следующими параметрами: модуль сдвига $G_2=3{,}3\cdot10^7$ Па, коэффициент потерь $\eta_2=1$, плотность $\rho_2=1$ г/см$^3$.

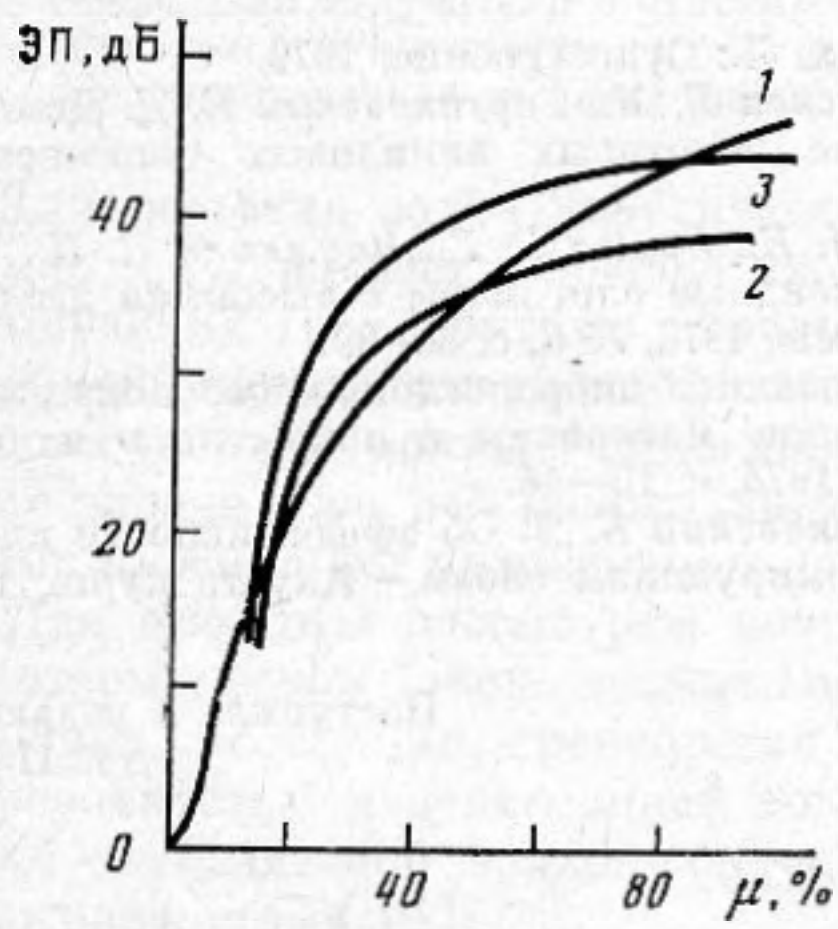
Коэффициент потерь пластины с армированным покрытием увеличивается с повышением жесткости на растяжение армирующего слоя $K_3=H_3E_3$. В связи с этим наилучшим материалом для армирующего слоя является сталь, позволяющая достичь высоких значений $K$ при малых толщинах армирующего слоя.

Анализ влияния изменения толщин вибропоглощающего и армирующего слоев армированного покрытия на величину $\eta_\Sigma$ (фиг. 3) показал, что при равных весах покрытия изменение толщины армирующего слоя оказывает более сильное влияние и мало меняет толщину покрытия.

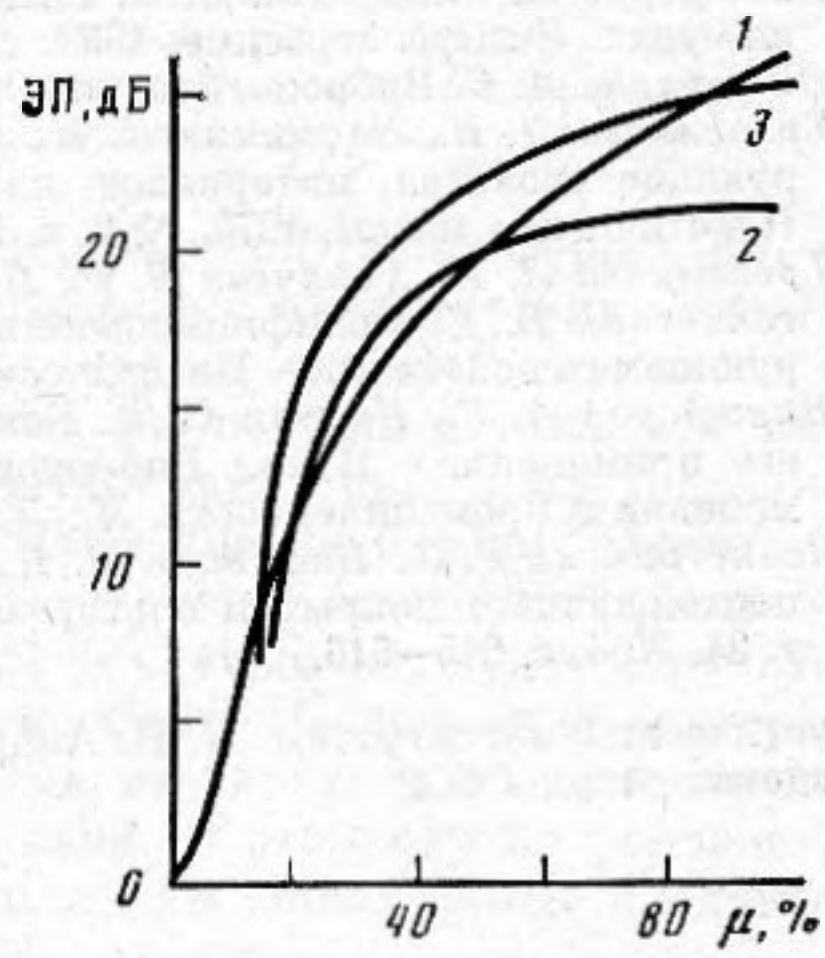
В связи с этим изменение веса армированного покрытия при расчете производилось за счет изменения толщины армирующего слоя при сохранении толщины вибропоглощающего слоя постоянной ($\beta_2=1$), в то время как для однослойного покрытия — за счет увеличения толщины покрытия.

Частотная зависимость $\eta_\Sigma$ и $B_\Sigma$ пластины с армированным покрытием учитывалась путем использования в расчетах значений этих параметров, усредненных в частотном диапазоне 10÷5000 Гц.

Для пластины с армированным покрытием, армирующий слой которого расчленен на отрезки оптимальной длины [9], был произведен расчет эффективности без учета частотной зависимости $\eta_\Sigma$ и $B_\Sigma$, так как в этом случае величина $\eta_\Sigma$ ниже частоты максимума, практически неизменна и примерно равна величине $h_{\Sigma\,max}$. Поэтому при расчете по формуле (2) принимались значения $h_\Sigma=h_{\Sigma\,max}$ и $B_\Sigma=B_2(f_{max})$.




Фиг. 4




Фиг. 5

Фиг. 4. Эффективность демпфирования резонансных вибраций стальной пластины различными вибропоглощающими покрытиями: однослойным – *1*, армированным со сплошным армирующим слоем – *2*, армированным с армирующим слоем, расчлененным на отрезки оптимальной длины – *3*

Фиг. 5. Эффективность демпфирования вибраций стальной пластины в полосе белого шума различными вибропоглощающими покрытиями (обозначения те же, что к фиг. 4)

Начальный коэффициент потерь демпфируемой пластины при расчетах принимался равным $\eta_0=10^{-2}$, что характерно для многих недемпфированных металлических конструкций.

Результаты расчета представлены на фиг. 4 и 5 соответственно для случаев демпфирования резонансных вибраций пластины и вынужденных вибраций в полосе белого шума. При наиболее распространенных на практике весах вибропоглощающих покрытий, составляющих от 20 до 40% веса демпфируемой пластины, эффективность армированного покрытия выше эффективности однослойного. Если армирующий слой в покрытии сплошной, превышение эффективности при демпфировании резонансных колебаний составляет от 1 до 3,5 дБ, а при демпфировании вибраций в полосе белого шума — от 0,5 до 1,5 дБ. Если же армирующий слой расчленен на отрезки оптимальной длины, превышение эффективности армированного покрытия достигает на резонансных частотах значений 5,5÷÷8,5 дБ, а в полосе белого шума — 2÷4,5 дБ.

Таким образом, расчет, учитывающий все факторы, влияющие на эффективность вибропоглощающих покрытий, опровергает полученное ранее [1] заключение о том, что при весе покрытия более 20% эффективность однослойного покрытия превышает эффективность армированного покрытия. Такое превышение имеет место лишь при весе покрытия более 80% от веса демпфируемой пластины.

В связи с вышеизложенным можно рекомендовать шире использовать в практике демпфирования вибраций инженерных конструкций армированные вибропоглощающие покрытия с армирующим слоем, расчлененным на отрезки оптимальной длины.

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Ross D., Kerwin E. M.* A comparison of the effectivness of homogeneous layers and constrained layers of viscoelastic material in damping flexural waves in plates.– Proceeding of the third Intern. Congr. in Acoust. Stuttgart, 1959, v. 1, p. 410–412.
2. *Борисов Л. П., Канаев Б. А., Рыбак С. А., Тартаковский Б. Д.* О критериях оценки эффективности вибропоглощающих покрытий.– Акуст. журн., 1974, т. 20, № 3, с. 352—359.
3. *Oberst H., Frankenfeld K.* Über die Dämpfung der Biegeschwingungen dünner Bleche durch festhaftende Beläge.– Akustishe Beihefte, 1952, H. 4, S. 181–194.
4. *Никифоров А. С., Будрин С. В.* Распространение и поглощение звуковой вибрации на судах. Л.: Судостроение, 1968.
5. *Никифоров А. С.* Вибропоглощение на судах. Л.: Судостроение, 1979.
6. *Трепелкова Л. И., Наумкина Н. И., Дубровская Г. М., Тартаковский Б. Д.* Демпфирующие свойства материалов на основе некоторых виниловых полимеров.— Пластические массы, 1978, № 2, с. 18—19.
7. *Трепелкова Л. И., Горячева В. Г., Палей М. И., Груша Г. Г., Наумкина Н. И., Тартаковский Б. Д.* Модифицированные эпоксидные олигомеры с высокими демпфирующими свойствами.– Пластические массы, 1973, № 8, с. 36–39.
8. *Никифоров А. С., Будрин С. В.* Комбинированное вибропоглощающее покрытие и его применение.– В кн.: Вибропоглощающие материалы и покрытия и их применение в промышленности. Л.: ЛДНТП, 1974, с. 15—16.
9. *Зейнетдинова Р. З., Наумкина Н. И., Тартаковский Б. Д.* Об эффективности вибропоглощающего покрытия с разрезным армирующим слоем.– Акуст. журн., 1978, т. 24, № 4, с. 615–616.



Акустический институт им. Н. Н. Андреева
Академии наук СССР



Поступила в редакцию
13.II.1984