

УДК 534.833

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АРМИРОВАННЫХ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

В. Ю. Кирпичников, А. П. Кошеев, А. И. Сятковский*

Крыловский государственный научный центр, 196158 Санкт-Петербург, Россия

* Открытое акционерное общество "Пластполимер", 195197 Санкт-Петербург, Россия

E-mails: sotnik26@bk.ru, kapet1@rambler.ru, nauka@plastpolymer.com

Проведены измерения уровней вибрации металлической пластины в отсутствие и при наличии на ее поверхности одного армированного покрытия либо размещенных на ней одного или двух армированных покрытий с такой же или отличающейся толщиной. Определена и сопоставлена эффективность различных схем облицовки пластины покрытиями.

Ключевые слова: вибропоглощение, вибровозбудимость, армирующие покрытия, резонансные частоты, вязкоупругий слой.

DOI: 10.15372/PMTF20220109

Введение. Одним из основных способов уменьшения вибрации и шумоизлучения пластинчатых и оболочечных конструкций различного назначения является армирование их вибропоглощающими покрытиями. Армированные вибропоглощающие покрытия (АВП) состоят из диссипативного слоя, упругого материала, в котором имеют место потери колебательной энергии, и армирующего слоя, в качестве которого обычно используется металлическая пластина [1].

Наиболее эффективными в широком диапазоне частот являются АВП, содержащие диссипативный слой полимерной пленки на основе поливинилацетата, превосходящего по уровню вибропоглощения существующие материалы [2, 3]. (В данной работе под эффективностью покрытий понимается разность уровней вибрации демпфируемой конструкции в отсутствие АВП и при его наличии.) Подобные покрытия, в отличие от АВП с такой же эффективностью, в состав которых входят другие вибропоглощающие материалы, имеют существенно меньшую толщину и массу [3, 4]. Эти преимущества обусловлены тем, что в АВП с диссипативным слоем на основе поливинилацетата наиболее интенсивные потери колебательной энергии происходят в тонком слое, непосредственно прилегающем к поверхности демпфируемой конструкции [5].

Зависимость эффективности АВП с полимерной пленкой из поливинилацетата от его толщины экспериментально исследовалась в работах [3, 6, 7]. В частности, установлено, что увеличение эффективности АВП имеет место при увеличении толщины армирующего слоя, а следовательно, и массы покрытия до значений, очень малых по сравнению с толщиной и массой демпфируемой пластины. Например, для диссипативного слоя из поливинилацетата толщиной 0,5 мм с армирующим слоем из алюминия толщиной $h_1 = 0,2$ мм эффективность АВП, площадь которого составляет 60 % площади стальной пластины

толщиной $h_0 = 3$ мм, в диапазоне низших резонансных частот ее изгибных колебаний равна $13 \div 19$ дБ. Увеличение эффективности АВП на основе той же полимерной пленки приблизительно на 10 дБ было достигнуто при увеличении толщины армирующего слоя из алюминия в пять раз. При этом масса μ покрытия увеличилась до значения, составляющего приблизительно 9 % массы демпфируемой пластины. Дальнейшее увеличение толщины армирующего слоя, а следовательно, и массы АВП к значительному увеличению его эффективности не приводило. Это позволило сделать вывод, что использование для уменьшения вибрации и шумоизлучения конструкций АВП на основе поливинилацетата с толщиной армирующего слоя из алюминия $h_1 > h_0/3$ и относительной массой $\mu > 9$ % нецелесообразно.

Приведенные выше результаты, подтверждающие высокую эффективность АВП с диссипативным слоем на основе пленки из поливинилацетата при их малой толщине и массе, получены в [3, 6, 7] при исследовании вибродемпфирования металлических пластин с малыми потерями колебательной энергии. Коэффициент потерь колебательной энергии η в испытанных пластинах не превышал $2 \cdot 10^{-3}$. Облицовка одной из поверхностей пластин покрытием привела к увеличению значения коэффициента потерь приблизительно на порядок. Такие, а иногда и бóльшие потери колебательной энергии происходят во многих демпфируемых конструкциях. Влияние демпфирования данных конструкций тонким АВП с диссипативным слоем на основе даже поливинилацетата будет незначительным. Повышение эффективности рассматриваемого АВП без существенного увеличения его массы может быть достигнуто только путем увеличения в нем потерь колебательной энергии. Одним из способов увеличения этих потерь является размещение на тонком АВП одного или нескольких подобных высокоэффективных покрытий, также имеющих малую толщину.

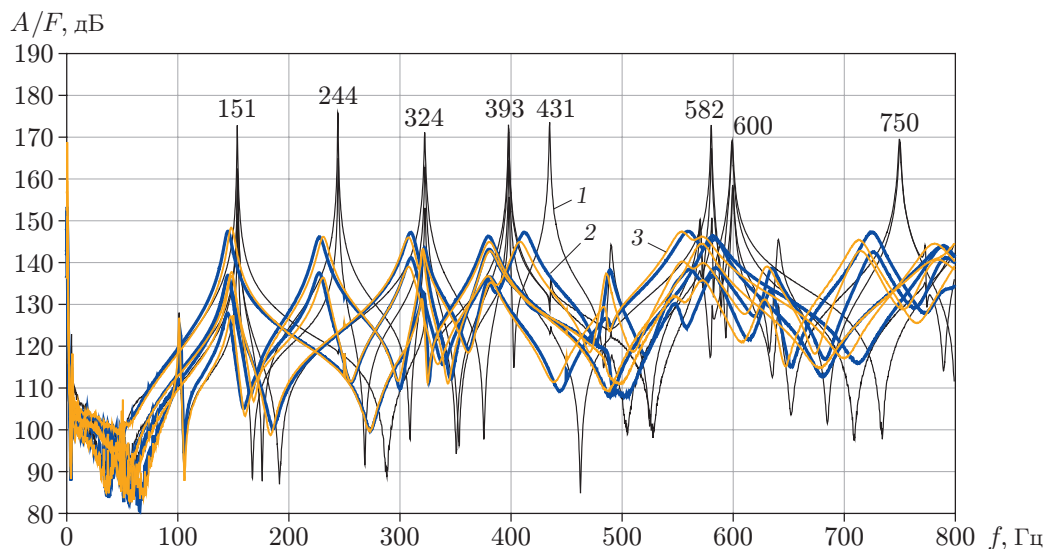
В данной работе проведены измерения уровней вибрации металлической пластины в отсутствие и при наличии на ней как одного высокоэффективного АВП на основе поливинилацетата, так и АВП с размещенными на нем одним или двумя тонкими покрытиями с армирующим слоем из алюминия различной толщины.

Описание эксперимента. В качестве демпфируемой конструкции использовалась стальная пластина с размерами $0,520 \times 0,380 \times 0,003$ м, закрепленная на монтажной рамке. Пластина представляет собой участок обшивки конструкции с перекрестным подкреплением, расположенный между его элементами. Вибровозбудимость и шумоизлучение таких участков конструкций на резонансных частотах изгибных колебаний имеют, как правило, наибольший уровень.

Испытанные покрытия устанавливались на одну из поверхностей пластины. Площадь покрытий размером $0,4 \times 0,3$ м составляла приблизительно 60 % площади демпфируемой пластины.

Возбуждение пластины осуществлялось многократными ударами по ее необлицованной поверхности миниатюрным вибромолотком с датчиком силы. Каждый вариант облицовки пластины покрытиями испытывался при ее последовательном возбуждении в четырех точках, три из которых находились в зонах пучностей низших форм изгибных колебаний пластины, а четвертая — на одинаковых расстояниях от ее геометрического центра и одного из углов.

Измерения вибрации проводились на необлицованной поверхности пластины в точках, находящихся в непосредственной близости от точек возбуждения пластины. Уровни виброускорения A пластины, нормированные силой F , далее называются уровнями ее входной вибровозбудимости. Входная вибровозбудимость A/F измеряется в децибелах относительно порогового уровня виброускорения $A_0 = 10^{-6}$ м/с² ($A/F = 20 \lg (AF_0/(A_0F))$), где $F_0 = 1$ Н).



Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины в отсутствие (линии 1) и при наличии ВПП 10 (линии 2) и ВПП 11 (линии 3)

Диссипативным слоем всех испытанных АВП являлась полимерная пленка на основе поливинилацетата толщиной 0,5 мм (ТУ 4515-001-00203521-93). В качестве армирующего слоя покрытий использовалась алюминиевая фольга или пластина.

Результаты измерений. На начальном этапе определялись вибрационные характеристики демпфируемой пластины. Измерения вибрации выполнялись в диапазоне частот $f = 0 \div 6400$ Гц. Исследовался диапазон $f = 0 \div 800$ Гц, в котором находились низшие резонансные частоты f_{qn} изгибных колебаний пластины (q, n — количество полуволн изгибных колебаний пластины вдоль ее кромок). На рисунке приведены узкополосные ($\Delta f = 0,25$ Гц) спектры входной вибровозбудимости пластины A/F в отсутствие на ней покрытий (кривые 1). Видно, что наибольшие уровни резонансных максимумов в приведенных спектрах имеют приблизительно одинаковый порядок значений от 170 дБ при $f = 600, 750$ Гц до 177 дБ при $f = 244$ Гц. Коэффициент потерь η_{qn} колебательной энергии в пластине на резонансных частотах f_{qn} определялся с использованием отношения $\eta_{qn} = \Delta f_{qn}/f_{qn}$, где Δf_{qn} — ширина резонансного максимума, который на 3 дБ меньше его наибольшего значения на частоте f_{qn} . Значения η_{qn} на всех частотах в диапазоне $f = 0 \div 800$ Гц оказались практически одинаковыми и приближенно равными $2 \cdot 10^{-3}$.

Эффективность вибродемпфирования одним и двумя покрытиями. Были испытаны четыре варианта пластины с одним покрытием и семь вариантов пластины с нанесенным на него вторым армирующим вибропоглощающим покрытием.

Исследованы вибропоглощающие покрытия (ВПП) с первым армирующим слоем, расположенным непосредственно на пластине, толщиной $h_1 = 0,1$ мм и вторым слоем, нанесенным на первый, толщиной $h_2 = 0$ (ВПП 1), $h_2 = 0,01$ мм (ВПП 2), $h_2 = 0,1$ мм (ВПП 3), $h_2 = 0,2$ мм (ВПП 4); ВПП с первым армирующим слоем толщиной $h_1 = 0,2$ мм и вторым слоем толщиной $h_2 = 0$ (ВПП 5), $h_2 = 0,1$ мм (ВПП 6), $h_2 = 0,3$ мм (ВПП 7); ВПП с первым армирующим слоем толщиной $h_1 = 0,3$ мм и вторым слоем толщиной $h_2 = 0$ (ВПП 8), $h_2 = 0,2$ мм (ВПП 9); ВПП с первым армирующим слоем толщиной $h_1 = 1,0$ мм и вторым слоем толщиной $h_2 = 0$ (ВПП 10), $h_2 = 0,2$ мм (ВПП 11).

Спектры входной вибровозбудимости пластины, облицованной ВПП 10 и ВПП 11, приведены на рисунке (кривые 2, 3).

Эффективность E_n одного и двух покрытий

ВПП	μ_1 , %	μ_2 , %	E_n , дБ при резонансной частоте								E_n^* , дБ
			151 Гц	244 Гц	324 Гц	393 Гц	431 Гц	582 Гц	600 Гц	750 Гц	
1	2,2	0	10	14	13	14	16	15	13	14	14
2	2,2	0,3	10	15	13	14	16	15	14	14	14
3	2,2	2,2	13	18	16	18	20	18	15	17	17
4	2,2	2,9	21	26	22	25	25	24	21	22	23
5	2,9	0	13	19	15	17	19	17	15	18	17
6	2,9	2,2	17	23	19	24	23	22	20	20	21
7	2,9	3,6	20	24	21	23	25	23	20	22	22
8	3,6	0	15	21	17	18	20	19	15	19	18
9	3,6	2,9	20	24	21	23	25	23	20	23	22
10	8,5	0	25	30	25	28	27	26	23	24	26
11	8,5	2,9	25	30	25	28	29	26	23	25	26

Примечание. E_n^* — среднее значение эффективности покрытий.

Значения относительной массы первого μ_1 и второго μ_2 покрытий, а также эффективности E_n ($n = 1, 2, \dots, 11$) описанных вариантов их нанесения на пластину приведены в таблице. Для каждого варианта покрытий эффективность E_n представляет собой разность резонансных максимумов (в децибелах) в спектрах входной вибровозбудимости пластины на частотах f_{qn} при отсутствии и наличии АВП. В таблице указаны значения частот f_{qn} для наибольших значений A/F в отсутствие АВП.

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что наибольшая эффективность вариантов с двумя покрытиями по сравнению с эффективностью одного покрытия имеет место при двух наименьших толщинах ($h_1 = 0,1; 0,2$ мм) армирующего слоя, нанесенного непосредственно на пластину. Средняя эффективность ВПП 3, ВПП 4 и ВПП 6 с суммарной толщиной ($h_\Sigma = h_1 + h_2$) обоих АВП, удовлетворяющей условию $h_\Sigma \leq h_0/10$, больше эффективности одного АВП на 3,9 и 4 дБ соответственно. При этом эффективность ВПП 3 с суммарной толщиной обоих покрытий $h_\Sigma = 0,2$ мм практически такая же, как эффективность одного покрытия толщиной $h_1 = 0,3$ мм (ВПП 8). Средняя эффективность двух АВП (ВПП 4 и ВПП 6) с одинаковой суммарной толщиной $h_\Sigma = 0,3$ мм на 5 и 3 дБ соответственно превысила эффективность одного покрытия такой же толщины и практически совпала с эффективностью ВПП 9, в котором суммарная толщина армирующих слоев в 1,7 раза больше. Масса ВПП 4 и ВПП 6 в 1,3 раза меньше массы ВПП 9.

Сравнение величин, на которые уменьшаются уровни входной вибровозбудимости пластины после нанесения второго АВП, показывает, что его толщина h_2 должна быть больше толщины h_1 АВП, размещенного непосредственно на пластине. Действительно, эффективность ВПП 4 с $h_2 = 2h_1$ оказалась больше эффективности ВПП 3 с $h_2 = h_1$ и превысила эффективность ВПП 6 с $h_2 = 0,5h_1$, в случае когда покрытия расположены на пластине в обратном порядке.

Нанесение на пластину второго АВП, толщина h_2 которого существенно (в 5–10 раз) меньше толщины первого покрытия, повышает его эффективность незначительно. Так, эффективность ВПП 2 оказалась практически такой же, как эффективность ВПП 1, а эффективность ВПП 11 превысила эффективность ВПП 10 только на двух частотах, причем не более чем на 2 дБ. В этих двух случаях после нанесения второго покрытия коэффициент потерь колебательной энергии в пластине также не изменился. Его расчетно-экспериментальные значения составили 0,02 (ВПП 1, ВПП 2) и 0,036 (ВПП 10, ВПП 11).

При значениях толщины первого покрытия, удовлетворяющих условию $h_1 \leq h_0/10$, нанесение второго покрытия привело к существенному увеличению значений η . Среднее значение η для ВПП 3, ВПП 4, ВПП 6, ВПП 7, ВПП 9 (два покрытия) увеличилось по сравнению со значением η для ВПП 1, ВПП 5 и ВПП 8 (одно покрытие) почти в 1,5 раза и составило приблизительно 0,032. Наибольшие значения коэффициента потерь колебательной энергии в пластине с двумя покрытиями на отдельных частотах f_{qn} оказались приблизительно равными 0,038.

Эффективность вибродемпфирования тремя покрытиями. Определена также эффективность вариантов покрытий ВПП 12 (ВПП 4, дополненный АВП толщиной $h_3 = 0,3$ мм) и ВПП 13 (ВПП 9, дополненный АВП толщиной $h_3 = 0,1$ мм).

Эффективность описанных вариантов облицовки пластины тремя АВП оказалась практически одинаковой. Отличие полученных значений от эффективности ВПП 4 и ВПП 9 на отдельных резонансных частотах не превышало 2 дБ. Средние по восьми резонансным частотам колебаний пластины f_{qn} величины эффективности E_{12}^* и E_{13}^* оказались такими же, как эффективность ВПП 4 ($E_4^* = 23$ дБ).

Закключение. Проведенное исследование эффективности армированных вибропоглощающих покрытий позволяет сделать следующие выводы.

Эффективность схемы облицовки пластины двумя покрытиями с соотношением толщин $0,5 \leq h_1/h_2 \leq 2,0$ и суммарной толщиной $h_1 + h_2$, составляющей не более $1/10$ толщины h_0 демпфируемой пластины, на $4 \div 9$ дБ больше по сравнению с эффективностью одного покрытия, нанесенного непосредственно на пластину.

Наиболее существенное увеличение эффективности при нанесении второго покрытия зарегистрировано при его толщине h_2 , в два раза превышающей толщину h_1 первого покрытия.

При суммарной толщине двух покрытий, составляющей не менее $1/10$ толщины демпфируемой пластины, нанесение третьего покрытия приводит к незначительному (до 2 дБ) увеличению эффективности лишь на отдельных резонансных частотах изгибных колебаний пластины.

Приведенные в работе результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при разработке высокоэффективных схем низкочастотного вибродемпфирования пластинчатых конструкций тонкими армированными покрытиями.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никифоров А. С.** Акустическое проектирование судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1990.
2. **Алексеев С. А., Сятковский А. И.** Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. Вып. 6. С. 45–47.
3. **Кирпичников В. Ю., Сятковский А. И.** Уменьшение вибрации конструкций тонкими армированными покрытиями на основе полимерной ВПС пленки // Материалы 6-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием “Защита от повышенного шума и вибрации”, Санкт-Петербург, 21–23 марта 2017 г. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т “ВОЕНМЕХ”, 2017. С. 382–388.
4. **Кирпичников В. Ю.** Вред и польза резонансных явлений в элементах судовых конструкций. СПб.: Крылов. гос. науч. центр, 2019.
5. **Кирпичников В. Ю.** Об учете вязкости в жидкой среде, возмущенной поперечными колебаниями ограничивающей плоской поверхности // Прикл. механика. Отд.-ние математики, механики и кибернетики АН УССР. 1969. Т. 5, вып. 3. С. 41–53.

6. Кирпичников В. Ю., Сятковский А. И., Шлемов Ю. Ф. Высокоэффективные средства низкочастотного демпфирования с упругим элементом из полимерной пленки // Судостроение. 2020. Вып. 1. С. 44–47.
7. Кирпичников В. Ю., Смольников В. Ю., Шлемов Ю. Ф. Уменьшение уровней низкочастотной вибрации конструкций с помощью резонирующих пластинчатых вибропоглотителей // Тр. Крылов. гос. науч. центра. 2016. Вып. 92. С. 273–284.

*Поступила в редакцию 20/XI 2020 г.,
после доработки — 20/XI 2020 г.
Принята к публикации 30/XI 2020 г.*
