

УДК: 534.16  
OECD: 01.03.AA

## Экспериментальные исследования эффективности вибропоглощающего покрытия с металлическим армирующим слоем различной толщины

Кирпичников В.Ю.<sup>1</sup>, Сятковский А.И.<sup>2</sup>, Шашурин А.Е.<sup>3</sup>, Кудаев А.В.<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Д.т.н., профессор, ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,  
г. Санкт-Петербург, РФ

<sup>2</sup> К.х.н., директор по науке ОАО «Пластполимер», г. Санкт-Петербург, РФ

<sup>3</sup> Д.т.н., профессор, <sup>4</sup> К.т.н., доцент

<sup>3,4</sup> Кафедра «Экология и производственная безопасность», Балтийский государственный  
технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

### Аннотация

Кратко рассмотрена проблема негативного воздействия вибрации конструкций в помещениях транспортных средств на их технические характеристики и условия жизнедеятельности персонала и пассажиров. Показана актуальность применения армированных вибропоглощающих покрытий с жестким армирующим слоем для снижения вибрации конструкций. Проведен анализ экспериментальных значений эффективности вариантов вибропоглощающего покрытия с одинаковым диссипативным слоем в виде полимерной пленки из поливинилацетата, отличающихся материалом и толщиной армирующего слоя. Дано описание технологии подготовки демпфируемой пластины к испытаниям. Представлена методика определения эффективности покрытий с использованием уровней входной вибровозбудимости. Приведены спектры входной вибровозбудимости пластины с нанесенным и при отсутствии вибропоглощающего покрытия. Установлены диапазоны значений относительных массовых параметров покрытия с их интенсивным, умеренным и практически отсутствующим влиянием на его эффективность.

**Ключевые слова:** колебания, частота, диссипативный слой, армирование, вибропоглощающее покрытие.

### *Experimental studies of the effectiveness of a vibration-absorbing coating with a metal reinforcing layer of various thickness*

Kirpichnikov V.Yu.<sup>1</sup>, Syatkovsky A.I.<sup>2</sup>, Shashurin A.E.<sup>3</sup>, Kudaev A.V.<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> DSc, professor, Federal State Unitary Enterprise 'State Scientific Center Krylovsky', St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> PhD, Director of Science JSC 'Plastpolymer' St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> DSc, professor, <sup>4</sup> PhD, assistant professor

<sup>3,4</sup> The department of Ecology and Industrial Safety, Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinova, St. Petersburg, Russia

### Abstract

The article presents the problem of the negative impact of vibration of structures in premises of vehicles on their technical characteristics and living conditions of staff and passengers. The relevance of the application of reinforced vibration-absorbing coatings with a rigid reinforcing layer for reducing structural vibration is shown.

Moreover, analysis of experimental values of the effectiveness of variants of vibration-absorbing coating with the same dissipative layer in the form of a polymer film of polyvinyl acetate, differing in material and thickness of the reinforcing layer was carried out. The article also presents a description of the technology for preparing a damped plates for testing. The description of a technique for determining the effectiveness of coatings with using the levels of input vibroexcitability is suggested. The spectra of the input vibration excitability of the plate with applied and in the absence of vibration-absorbing coatings is described. Ranges of values of relative mass parameters are established coatings with their intense, moderate and practically absent influence on its efficiency.

**Keywords:** vibrations, frequency, dissipative layer, reinforcement, vibration absorbing coating.

## Введение

Уменьшение уровней вибрации и шума в помещениях транспортных средств является одним из основных направлений работ по улучшению их технических характеристик, а также по созданию комфортных условий для обслуживающего персонала и пассажиров.

Превышение уровней вибрации и шума над их предельно допустимыми значениями действующих санитарно-гигиенических нормативов ухудшает условия жизнедеятельности персонала, приводит к профессиональным заболеваниям, снижает внимательность, следствием чего может быть возникновение аварийных ситуаций. Интенсивная и продолжительная вибрация является причиной усталостных повреждений оборудования, фундаментных и корпусных конструкций.

Одним из основных направлений решения задачи уменьшения вибрации и шума транспортных средств является облицовка пластинчатых элементов (далее – пластин) конструкций вибропоглощающими покрытиями (ВПП). Наиболее широкое применение находят армированные ВПП, состоящие из диссипативного слоя упругого материала и жесткого армирующего слоя. При использовании упругих материалов с небольшими потерями колебательной энергии (например, резин) эффективность армированных ВПП, особенно на низких резонансных частотах демпфируемых пластин, оказывается малой даже при их относительно большой массе, составляющей 40 – 50% от массы пластин [1,2].

## 1. Направление работ по совершенствованию ВПП

С учетом изложенного, особую актуальность приобретают исследования по разработке армированных ВПП, имеющих малую массу и высокую эффективность в широком диапазоне резонансных частот демпфируемых пластин.

В силу меньшей плотности материалов упругого слоя в сравнении с плотностью традиционно применяемых металлических материалов армирующего слоя основными направлениями работ по уменьшению массы армированных ВПП являются уменьшение толщины, прежде всего металлического армирующего слоя, и его изготовление из жестких материалов, имеющих меньшую плотность, чем металлы. Основной путь одновременного, с уменьшением массы армированных ВПП, повышения их эффективности в широком диапазоне резонансных частот демпфируемых пластин – использование в качестве диссипативного слоя материалов с большим вибропоглощением. Известно, что применение таких, даже очень тонких (порядка 0,2 мм) материалов, способствует быстрому затуханию вибрационных процессов в демпфируемых пластинах и уменьшению уровней резонансных максимумов в широком частотном диапазоне их возникновения [3].

В последнее время для уменьшения толщины и массы армированных ВПП

и существенного увеличения их эффективности применяется полимерная пленка на основе поливинилацетата производства ОАО "Пластполимер", коэффициент потерь колебательной энергии которой в диапазоне температур наибольшего вибропоглощения находится в пределах значений от 2,0 до 3,0 [4].

## 2. ВПП, технология облицовки

С использованием в качестве материала диссипативного слоя армированного покрытия полимерной пленки типа ВПС-2,5 с температурами наибольшего вибропоглощения от 10 до 30°C были изготовлены и испытаны девять вариантов ВПП. Армирующий слой ВПП изготавливался из алюминиевой фольги толщиной 0,01 мм (ВПП 1), 0,1 мм (ВПП 2), 0,2 мм (ВПП 3), 0,3 мм (ВПП 4) и стального листа толщиной 0,12 мм (ВПП 5), 0,24 мм (ВПП 6), 0,6 мм (ВПП 7), 1,5 мм (ВПП 8), 3,0 мм (ВПП 9). Испытания всех покрытий выполнялись с использованием закрепленной на монтажной рамке стальной пластины с размерами в плане 0,52×0,38 м (рис. 1). Такая пластина является типичным наиболее вибровозбудимым элементом инженерных конструкций, расположенным между соседними подкреплениями. Толщина пластины при испытаниях всех ВПП равнялась 3 мм. Полимерная пленка из поливинилацетата всех девяти вариантов ВПП имела толщину 0,5 мм. Все варианты армированного ВПП наносились на одну поверхность пластины. Площадь облицовки пластины покрытием равнялась примерно 60%.

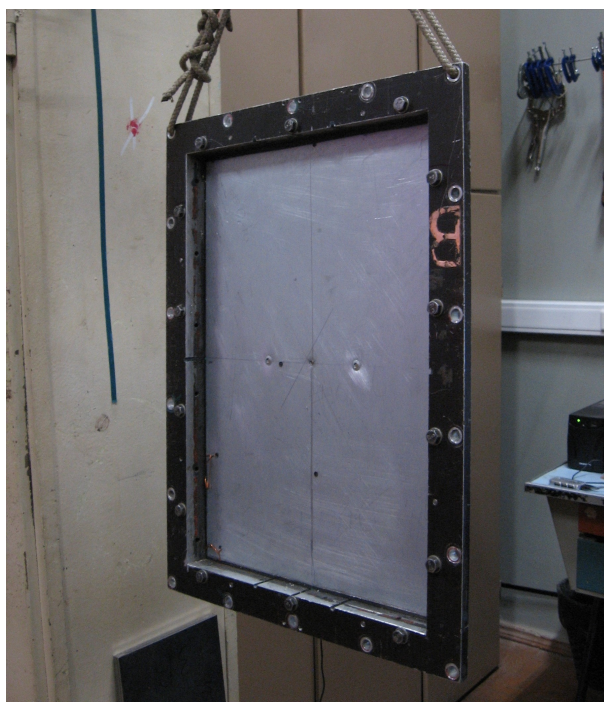


Рис. 1. Закрепленная на монтажной рамке стальная пластина, используемая для измерения вибровозбудимости ВПП

Технология подготовки демпфируемой пластины к испытаниям была одинаковой. Самоклеющуюся полимерную пленку ВПС-2,5 наносили сначала на очищенную ацетоном поверхность армирующего слоя, а затем приклеивали другую поверхность пленки к такому же образом обработанной поверхности демпфируемой пластины. Второй и последующие варианты покрытия наносились после демонтажа предыдущего и очистки поверхности демпфируемой пластины от остатков пленки.

### 3. Анализ результатов экспериментального определения эффективности ВПП

Эффективность покрытий определялась по разности уровней входной вибровозбудимости находящейся в воздухе пластины в отсутствие и при наличии покрытия. Под входной вибровозбудимостью  $A/F$  понимается уровень виброускорения  $A = 20 \lg \frac{aF_0}{a_0F}$ , где  $a_0 = 10^{-6} \text{ м/с}^2$  – пороговое значение ускорения  $a$  в точке возбуждения необлицованной ВПП поверхности пластины с помощью миниатюрного вибротолка;  $F$  – сосредоточенная поперечная сила, Н;  $F_0 = 1 \text{ Н}$  – амплитуда изменения силы  $F$ . Измерения выполнялись в диапазоне 0 – 6400 Гц. Основное внимание в дальнейшем уделено диапазону 0 – 1600 Гц, содержащему низшие резонансные частоты изгибных колебаний демпфируемой пластины, в котором эффективность применяемых ВПП, как правило, не превышает 6 – 10 дБ.

На рис. 2 изображены типичные узкополосные ( $\Delta f = 1 \text{ Гц}$ ) спектры входной вибровозбудимости испытанной пластины в отсутствие и при наличии (исключая ВПП 1) каждого варианта покрытия. Приведенные и использованные при последующем анализе спектры  $A/F$  в диапазоне 0 – 1600 Гц измерены в точках, находящихся в зонах пучностей форм изгибных колебаний четырех низших резонансных частот демпфируемой пластины. Сравнение эффективности  $\Theta$ , дБ, испытанных вариантов ВПП проводится с использованием ее значений, усредненных по указанным точкам измерения и пятнадцати наибольшим резонансным максимумам в спектрах входной вибровозбудимости пластины.

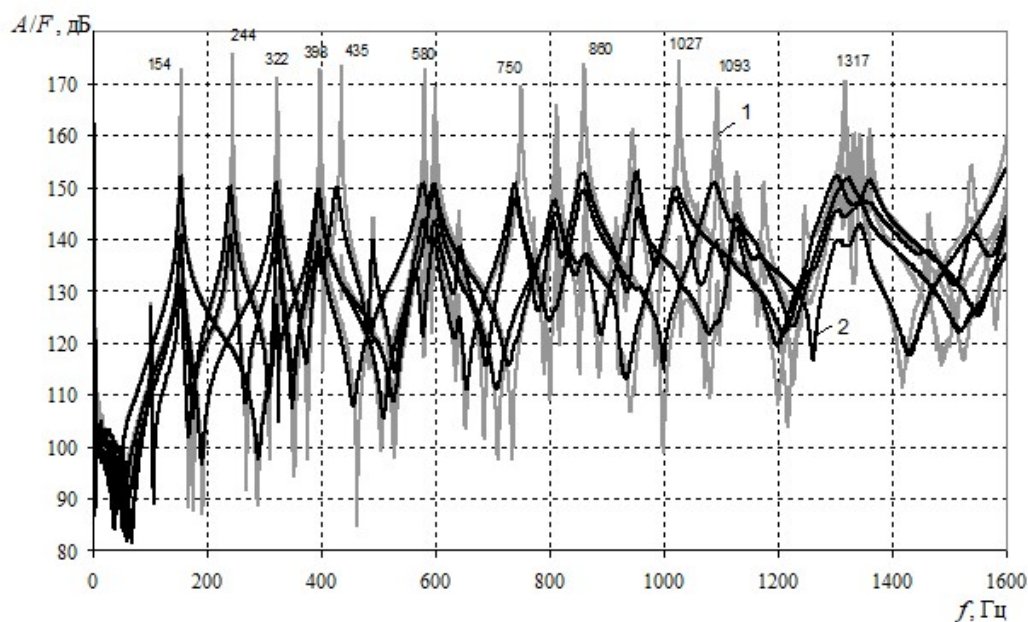


Рис. 2. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины в отсутствие (1) и при наличии (2) ВПП 5

Сопоставление приведенных на рис. 2 спектров показало, что облицовка пластины покрытием ВПП 5 со стальным листом толщиной 0,12 мм в качестве армирующего слоя приводит к уменьшению уровней ее резонансных максимумов в среднем на величину, равную приблизительно 21 дБ. Коэффициент потерь колебательной энергии в пластине увеличился от значения  $\eta \approx 3 \cdot 10^{-3}$  до значения  $\eta \approx 0,04$ . Отношение  $\mu$  массы ВПП 5 к массе пластины (4,62 кг) равнялось 3,8%.

При определении эффективности покрытий ВПП 1, 2, 3, 4 с алюминиевой фольгой и покрытий ВПП 6, 7, 8, 9 со стальным листом в качестве армирующего слоя получены

следующие результаты:

– облицовка пластины покрытием ВПП 1 ( $\mu = 1,6\%$ ) с толщиной фольги 0,01 мм приводит к незначительному (до 2 дБ) снижению уровней лишь некоторых резонансных максимумов; значение  $\Delta$  не превышает погрешность измерений;

– эффективность покрытий ВПП 2 ( $\mu = 2,2\%$ ) и ВПП 3 ( $\mu = 2,8\%$ ) практически одинаковая и меньше эффективности ВПП 5 приблизительно на 2 дБ; наиболее существенное (до 5 дБ) различие значений  $\Delta$  покрытий ВПП 2, 3, 5 зарегистрировано на трех низших резонансных частотах;

– эффективность покрытия ВПП 4 ( $\mu = 3,6\%$ ) с алюминиевой фольгой толщиной 0,3 мм не отличается от эффективности покрытия ВПП 5 со стальным листом толщиной 0,12 мм, имеющего практически такую же относительную массу;

– значения  $\Delta$  покрытий ВПП 6 ( $\mu = 6,2\%$ ), ВПП 7 ( $\mu = 13,2\%$ ), ВПП 8 ( $\mu = 30\%$ ) и ВПП 9 ( $\mu = 60\%$ ) равняются 26, 33, 34 и 35 дБ соответственно.

Наибольший рост эффективности (от 0 до 19 дБ) зарегистрирован при увеличении относительной массы покрытия от значения  $\mu = 1,6\%$  (ВПП 1) до значения  $\mu$ , равного 2,2% (ВПП 2). Масса алюминиевой фольги покрытия ВПП 1 (0,003 кг) была существенно (в 23 раза) меньше массы полимерной пленки. Влияние фольги на колебательный процесс в полимерной пленке покрытия ВПП 1, порождаемый действием на нее вибрации демпфируемой пластины, практически отсутствует. Поверхность полимерной пленки, на которой находится фольга с существенно меньшими, чем у пленки, толщиной и массой колеблется, с высокой вероятностью, так же, как и при отсутствии фольги.

Увеличение массы фольги на порядок (ВПП 2) и до значения, мало отличающегося от массы пленки (ВПП 3), усиливает действие фольги на пленку и приводит к существенному росту эффективности покрытий ВПП 2, 3 в сравнении с эффективностью покрытия ВПП 1. Дальнейший последовательный рост относительной массы покрытий ВПП 4, 5, 6, 7 и превышения  $k$  массы армирующего слоя над массой полимерной пленки (соответственно в 1,3, 1,54, 3,1 и 7,7 раза) приводит к увеличению их эффективности до значений 21, 21, 26 и 33 дБ. Эффективность покрытий ВПП 8, 9 с относительной массой  $\mu$ , существенно превышающей относительную массу покрытия ВПП 7 (примерно 13%), практически такая же, как у покрытия ВПП 7. Одинаковыми (порядка 30 дБ) оказались и значения эффективности покрытий ВПП 7, 8, 9 на более высоких, чем в диапазоне 0 – 1600 Гц, резонансных частотах.

## Заключение

С учетом приведенных результатов был сделан вывод о следующих трех диапазонах значений массовых параметров покрытий, имеющих металлический армирующий слой, с их различным влиянием на эффективность:

– диапазон с интенсивным ростом эффективности при увеличении  $\mu$  и  $k$  до значений примерно 2,2 – 2,5% и 0,5 – 1,2 соответственно;

– диапазон с меньшим ростом эффективности при увеличении  $\mu$  и  $k$  до значений примерно 13% и 8 соответственно;

– диапазон, в котором дальнейшее увеличение  $\mu$  и  $k$  до значений примерно 60% и 38 соответственно к росту эффективности ВПП испытанного типа практически не приводит.

Полученные результаты могут быть использованы при выполнении работ по уменьшению уровней вибрации и звукоизлучения пластинчатых элементов корпусных и внутрикорпусных конструкций транспортных средств, а также установленного на них оборудования различного функционального назначения.

### Список литературы

1. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций. Справочник. Л.: Судостроение, 1990.
2. Ионов А.В. Средства снижения вибрации на судах. СПб.: 2000.
3. Кирпичников В.Ю. Вред и польза резонансных явлений в элементах судовых конструкций. СПб.: 2019.
4. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. Вып. 6. С. 45–47.

### References

1. Nikiforov A.S. Acoustic design of ship structures. Directory. L.: Shipbuilding, 1990.
2. Ionov A.V. Means for reducing vibration on ships. St. Petersburg: 2000.
3. Kirpichnikov V.Yu. Harm and benefits of resonant phenomena in the elements of ship structures. St. Petersburg: 2019.
4. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibro-damping properties of polymer films // Shipbuilding. 2015. № 6. P. 45–47.