

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ

УДК 534.121.1+534.286
EDN: WNKQOO

В.Ю. Кирпичников, В.Ю. Смольников, Е.В. Яковлева
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ ПОЛОСОВОГО ВИБРОПОГЛОТИТЕЛЯ НА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Объект и цель научной работы. Объектом является пластина с типичными размерами однородных участков инженерных конструкций. Цель исследований – уменьшение уровней низшего резонансного максимума вибрации пластины полосовым вибропоглотителем.

Материалы и методы. Измерение уровней вибрации пластины. Сравнение уровней гасимого и смещенного вибропоглотителем резонансных максимумов в спектрах вибрации.

Основные результаты. Получена информация о влиянии на эффективность вибропоглотителя его длины, ширины и толщины.

Закключение. Приведенные результаты рекомендованы к использованию при разработке высокоэффективных полосовых вибропоглотителей, имеющих малые размеры и массу.

Ключевые слова: пластина, вибрации, резонансный максимум, полосовой вибропоглотитель, эффективность.
Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP SIGNATURES

UDC 534.121.1+534.286
EDN: WNKQOO

V.Yu. Kirpichnikov, V.Yu. Smolnikov, E.V. Yakovleva
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

EFFECT OF ANTI-VIBRATION STRAP DIMENSIONS UPON ITS EFFICIENCY

Object and purpose of research. This paper investigates a plate with typical dimensions of uniform sites in engineering structures. The purpose is to reduce lower resonance peak of plate vibration by means of anti-vibration strap.

Materials and methods. Measurement of plate vibration levels. Comparison of resonance peak in vibration spectra (damped vs shifted by anti-vibration strap).

Main results. The study yielded the information about the effect of anti-vibration strap dimensions (length, width, thickness) upon its efficiency.

Conclusion. The results of this study are recommended to use in design of high-efficiency anti-vibration strap featuring light weight and compact size.

Keywords: plate, vibrations, resonance peak, anti-vibration strap, efficiency.
The authors declare no conflicts of interest.

Для цитирования: Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю., Яковлева Е.В. Исследование влияния геометрических размеров полосового вибропоглотителя на его эффективность. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 4(414): 151–156.

For citations: Kirpichnikov V.Yu., Smolnikov V.Yu., Yakovleva E.V. Effect of anti-vibration strap dimensions upon its efficiency. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 4(414): 151–156 (in Russian).

Введение

Introduction

Одним из приоритетных направлений снижения уровней вибрации и шумоизлучения пластинчатых и оболочечных конструкций является создание и практическое применение малогабаритных и высокоэффективных средств вибродемпфирования.

Таковыми средствами являются, в частности, резонирующие (далее – резонансные) полосовые вибропоглотители (РПВ), в состав которых входит слой полимерной пленки из поливинилацетата, имеющего наибольшие потери колебательной энергии среди существующих вибропоглощающих материалов [1].

Имеются две разновидности таких вибропоглотителей [2].

В первом случае полоса облицовывается с одной или обеих сторон армированным вибропоглощающим покрытием (АВП) и закрепляется на демпфируемой конструкции с помощью болтовых соединений или магнитов.

Во втором случае самоклеящаяся полимерная пленка наносится одной стороной на полосу, а другой – приклеивается к поверхности демпфируемой конструкции. Эта далее рассматриваемая разновидность имеет более простое конструктивное оформление, но несколько меньшую эффективность. (Под эффективностью здесь и далее подразумевается разница между уровнями гасимого и наибольшего смещенного вибропоглотителем резонансных максимумов изгибных колебаний демпфируемой конструкции.)

Для достижения наибольшей эффективности РПВ осуществляют настройку низшей резонансной частоты f_1 их изгибных колебаний на частоту f_p гасимого резонансного максимума изгибных колебаний конструкции. Оценочное значение частоты f_1 обычно определяют, пренебрегая влиянием полимерной пленки, с использованием формулы для низшей резонансной частоты изгибных колебаний полосы длиной ℓ со свободными кромками:

$$f_1 = 3,57 \sqrt{\frac{B}{m\ell^4}},$$

где B и m – изгибная жесткость $Eh^3b/12$ и масса единицы длины ρhb полосы вибропоглотителя (h и b – толщина и ширина полосы, E и ρ – модуль Юнга и плотность ее материала). При этом выбор геометрических размеров ℓ , b и h производят лишь с учетом справедливого для полосы соотношения $\ell/b \geq 2,5$, при котором влияние ширины b на частоту

f_1 при использовании приведенной формулы в расчет не берется.

Вместе с тем можно ожидать, что возникающая при таком выборе геометрических размеров вибропоглотителей неопределенность в части их влияния на инерционно-жесткостные характеристики полосы и, следовательно, на ее взаимодействие как со слоем полимерной пленки, так и с демпфируемой конструкцией, оказывает непосредственное влияние также на эффективность вибропоглотителей.

Практический интерес представляет и определение влияния на эффективность вибропоглотителей неизбежного ухудшения их частотной настройки при несовпадении значений геометрических размеров от их величин, при которых $f_1 = f_p$.

Целью настоящей работы являлось последовательное экспериментальное определение влияния каждого геометрического размера вибропоглотителя на эффективность уменьшения им уровней низшего резонансного максимума в спектрах пластины с размерами и диссипативными характеристиками, типичными для участков (ячеек) инженерных конструкций, находящихся между соседними подкреплениями. На частоте указанного резонансного максимума в большинстве случаев возникают наибольшие уровни шумоизлучения конструкций.

Экспериментальные средства

Test equipment

Измерения эффективности вибропоглотителей выполнялись с использованием пластины толщиной $h_1 = 3$ мм с размерами в плане $0,52 \times 0,38$ м, кромки которой закреплялись на монтажной рамке из швеллеров. Демпфирование пластины осуществлялось установкой вибропоглотителей на одну из ее поверхностей с размещением геометрического центра (ГЦ) каждого испытанного вибропоглотителя над ГЦ пластины. Наибольший размер вибропоглотителей был параллелен ее длинным кромкам.

В качестве вибропоглощающего материала во всех вибропоглотителях использована полимерная пленка марки ВПС-2,5 из поливинилацетата толщиной 0,5 мм, имеющая максимальный коэффициент потерь $\eta = 1 \div 3$ в диапазоне температур от 10 до 30 °С [1]. Испытания выполнялись при комнатной температуре.

Измерения уровней вибрации пластины при отсутствии и наличии вибропоглотителей производились при ее ударном возбуждении миниатюрным вибромолотком, содержащим датчик контроля силы. Место удара и размещения вибродатчика на пла-

стине находилось на свободной от вибропоглопителей поверхности. Во всех случаях измерялись уровни входной вибровозбудимости пластины. Под входной вибровозбудимостью подразумевается величина $A/F = 20\lg(AF_0/\alpha_0 F)$, дБ, где A – уровень виброускорения в точке возбуждения силой F , Н; α_0 – пороговый уровень виброускорения, 10^{-6} м/с²; $F_0 = 1$ Н.

Измерения выполнялись в четырех точках. Одна находилась в геометрическом центре пластины, а другие – на одинаковом расстоянии от ГЦ до короткой и длинной кромок, а также до одного из углов пластины. Отличия величин эффективности, полученных в разных точках, от среднего значения не превышало 2 дБ. При дальнейшем анализе используются результаты измерений A/F только в ГЦ пластины.

Результаты измерений

Measurement results

Влияние длины вибропоглотителя

Зависимость эффективности вибропоглотителя от его длины определялась с использованием группы из 15 образцов, имеющих ширину $\sim 0,09$ м и толщину 1,5 мм. Длина наибольшего вибропоглотителя равнялась длине ℓ_1 пластины $\ell_1 = 0,5$ м, а наименьшего – $0,3\ell_1$. Относительная масса μ соответствующих вибропоглотителей составляла соответственно $\sim 12\%$ и $\sim 3,6\%$ массы пластины.

В составе испытанной группы имелся резонансный полосовой вибропоглотитель с длиной $\ell = 0,23$ м ($\mu \approx 5,4\%$), при которой оценочное значение низшей резонансной частоты f_1 его стальной полосы равнялось измеренному значению низшей резонансной частоты $f_p = 155$ Гц изгибных колебаний демпфируемой пластины без средств вибродемпфирования.

Величины эффективности вибропоглотителей в функции от их длины изображены кривой 1 на рис. 1. Видно, что в значительном диапазоне длин, от 0,22 до 0,45 м, эффективность вибропоглотителей является практически одинаковой и составляет ~ 18 дБ. При большей (0,5 м) и меньших (0,2 м; 0,18 м; 0,16 м) длинах наблюдаются рост и уменьшение эффективности до максимального и наименьшего значений – примерно 22 и 13 дБ.

С учетом одинаковых значений ширины и толщины вибропоглотителей можно предположить, что указанные изменения эффективности обусловлены ухудшением частотной настройки их полосы из-за существенных отличий ее длины и массы от соответствующих параметров частотно настроенного РПВ с размерами $0,23 \times 0,09 \times 0,0015$ м.

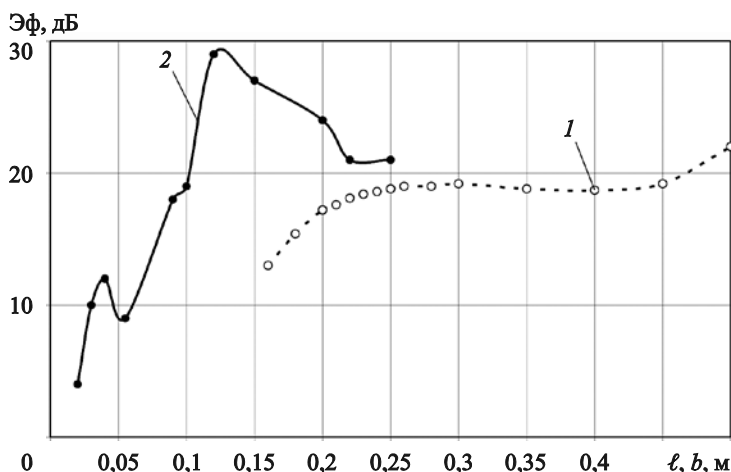
Влияние ширины вибропоглотителя

Зависимость эффективности вибропоглотителя от его ширины определялась с использованием группы из 11 образцов, имеющих одинаковые длину $\ell = 0,23$ м и толщину (1,5 мм). Ширина наибольшего по массе вибропоглотителя ($\mu = 14,7\%$) равнялась 0,25 м, а наименьшего ($\mu = 1,3\%$) – 0,025 м. В составе группы находился ранее испытанный резонансный полосовой вибропоглотитель с размерами $0,23 \times 0,09 \times 0,0015$ м, оценочно настроенный на частоту 155 Гц. Практически на ту же или близкую к ней частоту были оценочно настроены и четыре РПВ с шириной меньше 0,09 м.

Обратимся к кривой 2 на рис. 1, соединяющей величины эффективности вибропоглотителей (точки), имеющих разную ширину. Видно, что приведенная зависимость имеет два четко выраженных участка с промежуточным значением ширины 0,12 м. В первом наблюдается преимуще-

Рис. 1. Зависимости эффективности уменьшения уровней входной вибровозбудимости пластины от длины (кривая 1) и ширины (кривая 2) вибропоглотителя (точки соответствуют экспериментальным значениям)

Fig. 1. Efficiency of vibration excitability decrease at the input of the plate as function of length (Curve 1) and width (Curve 2) of anti-vibration strap (the dots correspond to experimental values)



ственный (с небольшими отклонениями) рост эффективности, а во втором – уменьшение эффективности с увеличением ширины и массы вибропоглопителя.

Анализ зависимости эффективности вибропоглопителя в диапазоне изменения b от 0,025 м до 0,12 м показал малое влияние его массы на рост эффективности. Особенно это заметно при изменении b от 0,1 м до 0,12 м. Действительно, при увеличении массы РПВ в 1,2 раза и пропорционального роста от него эффективности (~2 дБ) она возрастает примерно на 10 дБ.

Сделано предположение, что соответствующий интенсивный рост эффективности с дальнейшим ее уменьшением при увеличении ширины и массы вибропоглопителя может быть обусловлен влиянием на его эффективность резонансных процессов в полимерной пленке. Возможность возникновения резонанса при упругих колебаниях поливинилацетата подтвердили расчетные оценки. Действительно, при значениях модуля упругости E и плотности ρ поливинилацетата [1] в пределах от 10^6 до $2 \cdot 10^6$ Па и от 1200 до 1600 кг/м³ скорость распространения в нем упругих волн $C = \sqrt{E/\rho}$ находится в диапазоне от 25 до ~47 м/с, а ширина РПВ, при которой в поливинилацетате также возникает резонанс на частоте 155 Гц $\left(b = \frac{C}{2f_p} \right)$, – в диапазоне

от 0,07 до 0,15 м. Согласно эксперименту соответствующее предполагаемое совпадение резонансных частот в пластине (f_p) и поливинилацетате (f_2) имеет место при ширине вибропоглопителя 0,12 м, которое мало отличается от ее среднего расчетного значения.

Зависимость эффективности резонансного полосового вибропоглопителя от толщины полосы

Представленные на рис. 2 зависимости эффективности РПВ от толщины h полосы получены при ее значениях 0,5 мм (~0,16 h_1); 1 мм (~0,33 h_1); 1,5 мм (~0,5 h_1); 3 мм ($h = h_1$). Кривая 1 соответствует испытаниям группы РПВ с настроенной на частоту 155 Гц только его стальной полосой, а кривая 2 – группе вибропоглопителей с расчетной резонансной частотой 155 Гц колебаний как в полосе, так и предположительно в полимерной пленке.

Оценочная длина ℓ полосы вибропоглопителей первой группы с ранее указанными значениями толщины соответственно равнялась 0,12 м; 0,18 м; 0,23 м; 0,30 м, а их ширина удовлетворяла требованию быть равной 0,4 ℓ . Ширина каждого РПВ второй группы равнялась 0,12 м, т.е. размеру, при котором в полимерной пленке на частоте 155 Гц предположительно возникал упругий резонанс с полуволной, равной ширине вибропоглопителей. РПВ с полосой, имеющей толщину $h = h_1 = 3$ мм и длину $\ell = 0,30$ м, ширина которого удовлетворяет условию $b = \ell/2,5$, условно может быть отнесен как к первой, так и ко второй группе.

Обращаясь к рис. 2, видим существенно большую эффективность РПВ второй группы с толщинами 0,5 мм; 1,0 мм; 1,5 мм и шириной 12 мм в сравнении с вибропоглопителями первой группы с теми же толщинами и меньшей шириной, равной примерно 0,05 м, 0,07 м и 0,08 м. Наибольшая разница ~17 дБ значений эффективности зарегистрирована при $h = 1$ мм. При всех трех толщинах повышение эффективности превосходило расчетную оценку ее роста, обусловленного увеличением

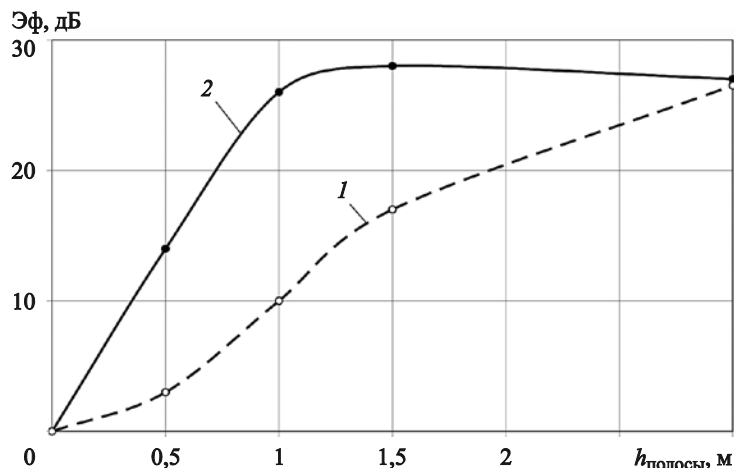
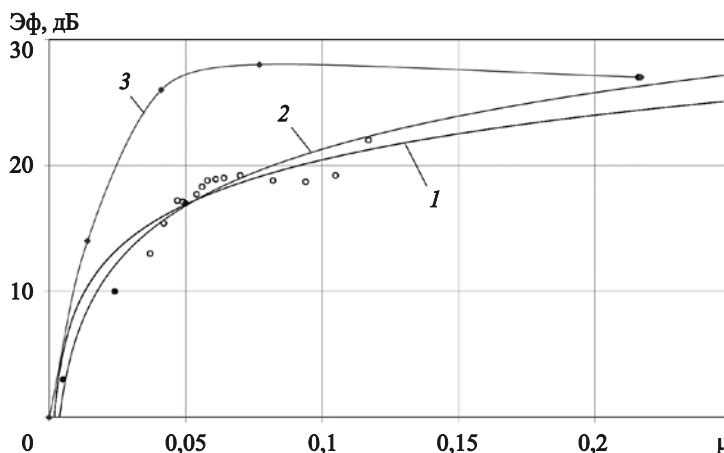


Рис. 2. Эффективность уменьшения уровней входной вибровозбудимости пластины от толщины полосы с предельно допустимой шириной $b = \ell/2,5$ (1) и шириной $b = 0,12$ м (2)

Fig. 2. Efficiency of vibration excitability decrease at the input of the plate as function of thickness of the strap with maximum acceptable width $b = \ell/2,5$ (1) and width $b = 0,12$ m (2)

Рис. 3. Эффективность уменьшения входной вибровозбудимости пластины от относительной массы μ резонансного полосового вибропоглотителя (РПВ).
1 – частотно ненастроенные РПВ;
2 – РПВ с $f_1 = f_p$; 3 – РПВ с $f_1 = f_2 \approx f_p$

Fig. 3. Efficiency of vibration excitability decrease at the input of the plate as function of relative weight μ of resonant anti-vibration strap (AVS).
1 – no AVS frequency tuning; 2 – AVS with $f_1 = f_p$;
3 – AVS with $f_1 = f_2 \approx f_p$



ширины и массы РПВ, на величину от 3 дБ (при $h = 0,5$ мм) до 9 дБ (при $h = 1$ мм).

О большем в сравнении с массой влиянии совместных резонансных колебаний в полосе и в полимерной пленке свидетельствует и несколько меньшая эффективность РПВ с размерами $0,3 \times 0,12 \times 0,003$ м в сравнении с более легким (примерно в 4,1 раза) РПВ, имеющим размеры в плане $0,22 \times 0,08$ м и толщину 1,5 мм.

Зависимость эффективности вибропоглотителей от их массы

Приведенные на рис. 3 зависимости построены для следующих вариантов испытанных вибропоглотителей:

- частотно ненастроенные, f_1 и f_2 отличаются от f_p (кривая 1);
- частота $f_1 = f_p$, а частота $f_2 \neq f_p$ (кривая 2);
- частоты f_1 и f_2 условно равняются частоте f_p (кривая 3).

Обращаясь к рис. 3, видим сравнительно малое отличие эффективности одинаковых по массе вибропоглотителей двух первых групп и существенно большую в сравнении с ними эффективность вибропоглотителей с обеими резонансными частотами, равными частоте резонансного максимума демпфируемой пластины.

Заключение

Conclusion

К основным результатам работы отнесем следующие:

- установлена практически одинаковая вибродемпфирующая эффективность вибропоглотителей при изменении длины в пределах от примерно 1,0 до 2,0 ее расчетного значения ℓ , по-

лученного с использованием формулы для настройки нижней резонансной частоты изгибных колебаний полосы f_1 вибропоглотителя на частоту f_p гасимого резонансного максимума вибрации демпфируемой пластины;

- зарегистрирован незначительный рост эффективности РПВ при размере, равном $2,2\ell$, и ее снижение при длинах, меньших, чем ℓ ;
- показан рост эффективности резонансного полосового вибропоглотителя при увеличении ширины от минимальной величины $\sim 0,11\ell$ до наибольшего значения $\sim 0,52\ell$;
- установлено, что максимальная величина эффективности обусловлена возникновением по ширине полимерной пленки полуволнового резонанса упругих колебаний ее материала;
- установлено, что увеличение толщины полосы РПВ от $\sim 0,16h_1$ до $\sim 0,33h_1$ приводит к существенному росту эффективности; дальнейшее увеличение толщины полосы до толщины пластины эффективность РПВ практически не повышает;
- показано, что при конкретной толщине полосы эффективность РПВ с резонансными явлениями одновременно в полосе и в полимерной пленке превосходит эффективность вибропоглотителя с резонансом только по длине полосы с ее шириной $b = 0,4\ell$ на величину от 3 дБ до 8 дБ.

Приведенные результаты могут быть использованы при разработке размеров РПВ, которые обеспечивают наибольшее уменьшение уровней гасимого резонансного максимума в спектрах вибрации инженерных пластинчатых конструкций.

Авторы выражают благодарность Валентину Викторовичу Савенко за полезные советы по улучшению содержания статьи.

Список использованной литературы

1. *Алексеев С.А., Сятковский А.И.* Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. № 6. С. 45–46.
2. *Кирпичников В.Ю.* Вред и польза резонансных явлений в элементах судовых конструкций. Санкт-Петербург: Крыловский государственный научный центр, 2019. 176 с.

References

1. *Alexeev S.A., Syatkovsky A.I.* Damping parameters of polymeric films // Sudostroenie (Shipbuilding). 2015. No. 6. P. 45–47 (in Russian).
2. *Kirpichnikov V.Yu.* Structural resonances aboard ship: pros and cons. St. Petersburg: Krylov State Research Centre, 2019. 176 p. (in Russian).

Сведения об авторах

Кирпичников Валерий Юлианович, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия,

Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: sotnik26@bk.ru.

Смольников Василий Юрьевич, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: krylov@ksrc.ru.

Яковлева Елена Владимировна, ведущий инженер ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: e.yakovleva@mail.com.

About the authors

Valery Yu. Kirpichnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-48-01. E-mail: sotnik26@bk.ru.

Vasily Yu. Smolnikov, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: krylov@ksrc.ru.

Elena V. Yakovleva, Lead Engineer, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoe sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: e.yakovleva@mail.com.

Поступила / Received: 18.09.25

Принята в печать / Accepted: 24.11.25

© Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю., Яковлева Е.В., 2025