

УДК: 629.5.015.5
OECD: 01.03. AA

Экспериментальные исследования эффективности полосового вибропоглотителя с однотоочечным креплением

Кирпичников В.Ю.¹, Кошечев А.П.², Кудаев А.В.^{3*}
^{1,2} ФГУП «Крыловский государственный научный центр»
³ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
^{1,2,3} г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Объектом данной работы является пластина – элемент инженерной конструкции, расположенный между ее соседними подкреплениями. Цель работы - исследование эффективности вибропоглотителя в виде задемпфированной полосы с креплением вне ее геометрического центра. Измерены спектры вибрации пластины без вибропоглотителя и при его установке. Эффективность вибропоглотителя определена по разнице уровней вибрации при его отсутствии и наличии. Наличие вибропоглотителя приводит к уменьшению уровней вибрации в широком диапазоне низких и средних звуковых частот. Показана возможность существенного снижения вибрации пластин инженерных конструкций путем установки на них малогабаритных вибропоглотителей с большими потерями колебательной энергии. Приведены значения эффективности вибропоглотителя в узкополосных и третьоктавных полосах, полученные для нескольких мест его установки.

Ключевые слова: пластина, входная вибровозбудимость, резонансные частоты, вибропоглотитель, крепление вне геометрического центра, эффективность.

Experimental studies of the effectiveness of a strip vibration absorber with a single-point fastening

Kirpichnikov V.Yu.¹, Koshcheev A.P.², Kudaev A.V.^{3*}
^{1,2} Federal State Unitary Enterprise 'Krylovsky State Scientific Center'
³ Baltic State Technical University 'VOENMEH' named after D.F. Ustinov
^{1,2,3} St. Petersburg, Russia

Abstract

The object of this work is a plate - an element of an engineering structure located between its adjacent reinforcements. The purpose of the work is to study the effectiveness of a vibration absorber in the form of a damped strip with fastening outside its geometric center. The vibration spectra of the plate without vibration absorber and with its installation were measured. The effectiveness of the vibration absorber is determined by the difference in vibration levels in its absence and presence. The presence of a vibration absorber leads to a decrease in vibration levels in a wide range of low and medium sound frequencies. The possibility of a significant reduction in the vibration of plates of engineering structures by installing small-sized vibration absorbers with large losses of vibrational energy is shown. The efficiency values of the vibration absorber in narrow-band and one-third-octave bands, obtained for several places of its installation, are given.

Keywords: plate, input vibration excitability, resonant frequencies, vibration absorber, fastening outside the geometric center, efficiency.

*E-mail: ksiombarg1f@yandex.ru (Кудаев А.В.)

Введение

Одним из основных направлений улучшения акустических характеристик транспортных средств и оборудования является уменьшение уровней вибрации их корпусных и внутрикорпусных конструкций. Особенно актуальным это направление становится при повышенных уровнях вибрации и шумоизлучения конструкций в низкочастотном диапазоне и наличии в их частотных спектрах интенсивных тональных (дискретных) составляющих. Именно в этих случаях необходимы эффективные в широком диапазоне частот средства снижения вибрации.

Для уменьшения уровней низкочастотной вибрации и шумоизлучения пластин конструкций их поверхность (поверхности), как правило, облицовывают вибропоглощающими покрытиями. Наиболее широкое применение получили армированные вибропоглощающие покрытия (АВП), состоящие из диссипативного слоя вязкоупругого материала и армирующего слоя, которым является преимущественно металлическая пластина.

Применяемые АВП с диссипативным слоем, изготавливаемым обычно из резиновых или пластифицированных материалов, работоспособны в широкой полосе частот, однако их эффективность на низких частотах оказывается малой даже при относительной массе, достигающей 40-50% от массы демпфируемой конструкции [1]. При этом толщина АВП составляет не менее двух толщин обшивки демпфируемой конструкции.

Существенно меньшую массу и толщину при большей эффективности на низких частотах имеют АВП с диссипативным слоем из полимерной пленки на основе поливинилацетата, отличающимся наибольшим вибропоглощением по сравнению с существующими материалами [2].

При установке подобных покрытий с толщиной в два и более раз меньшей толщины пластины демпфируемой конструкции достигаются на низких частотах потери колебательной энергии с коэффициентом потерь η около 0,1. Однако дальнейшее увеличение толщины как диссипативного, так и армирующего слоев АВП к заметному повышению значений η не приводит [3].

Вместе с тем, при возбуждении таких конструкций, вызывающем появление в спектрах их вибрации, а, следовательно, и шумоизлучения, широкополосных резонансных максимумов, часто возникает необходимость более значительного уменьшения их уровней. Соответствующая задача может быть решена только путем дальнейшего повышения потерь колебательной энергии в конструкциях до значений η , существенно больших, чем при нанесении на них известных АВП. С этой целью могут быть использованы резонирующие (далее резонансные) пластинчатые или полосовые вибропоглотители (РПВ). Высокая эффективность в диапазоне низких частот, разработанных РПВ, устанавливаемых как на необлицованные, так и на облицованные армированным покрытием металлические пластинчатые конструкции, была подтверждена экспериментальными исследованиями, результаты которых приведены в работах [3-6].

Были испытаны, в частности, вибропоглотители двух типов. Каждый из вибропоглотителей содержал тонкую пластину из стали, толщина которой была существенно меньше толщины демпфируемой стальной пластины [4]. Вибропоглотитель первого типа приклеивался к демпфируемой пластине всей поверхностью посредством полимерной пленки толщиной 0,5 мм. РПВ второго типа содержит стальную пластинку, жестко точно закрепленную на демпфируемой пластине в своем геометрическом центре. Одна из поверхностей пластинки этого типа РПВ была облицована АВП на основе той же

полимерной пленки и более тонкого (примерно в 3-5 раз), чем демпфируемая пластинка, армирующего слоя.

На низших резонансных частотах пластины, в большинстве случаев, эффективность образцов РПВ второго типа значительно превосходит эффективность образцов первого типа с такой же площадью. Благодаря имеющемуся зазору пластина не ограничивает перемещения резонирующей пластинки РПВ второго типа, что способствует лучшему поглощению колебательной энергии.

Эффективность вибропоглотителей испытанных типов с размерами, соответствующими настройке их резонансной частоты с низшей изгибной формой колебаний на частоту повышенной вибрации пластины демпфируемой конструкции, оказалась существенно больше эффективности вибропоглотителей, имеющих примерно такие же размеры и настройку резонансной частоты с иными (поворотная, изгибно-крутильная) формами колебаний. При этом эффективность частотно настроенного вибропоглотителя, установленного в зоне пучности резонирующей формы изгибных колебаний демпфируемой пластины, существенно больше его эффективности при размещении в зоне узла той же формы.

Аналогичные выводы были сделаны на основе анализа результатов испытаний эффективности вибропоглотителей, резонирующим элементом которых являлись полосы – пластины с отношением длины к ширине, не меньшим чем 2,5.

Во всех случаях испытаний пластинчатых и полосовых вибропоглотителей второго типа их одиночное жесткое точечное крепление к демпфируемой пластине размещалось в геометрическом центре РПВ.

Целью настоящей работы являлись экспериментальные исследования эффективности полосового вибропоглотителя с креплением к демпфируемой пластине вне его геометрического центра. Особенности такого РПВ являются двукратное увеличение числа, по крайней мере, низших резонансных частот изгибных колебаний и по-видимому иной, в сравнении со случаем крепления РПВ в его геометрическом центре, характер взаимодействия изгибных процессов как в его неодинаковых участках между креплением и короткими кромками, так и в механической системе «вибропоглотитель - демпфируемая пластина». Оба отличительных фактора могут повлиять на эффективность вибропоглотителя.

1. Экспериментальная установка

Исследования эффективности РПВ с механическим креплением из винта и гаек выполнялись с использованием прямоугольной стальной пластины - типичного участка обшивки инженерной конструкции между ее соседними подкреплениями. Именно эти участки, обладающие лучшей вибровозбудимостью, создают на низших резонансных частотах их изгибных колебаний наибольшие уровни шумоизлучения конструкции. Размеры испытанной пластины в плане составляли 0,52x0,37 м, а ее толщина равнялась $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Кромки пластины закреплялись на раме из профилированных уголков.

Испытанный резонансный вибропоглотитель представлял собой облицованную с одной стороны армированным вибропоглощающим покрытием стальную полосу толщиной $0,56 \cdot 10^{-3}$ м с размерами в плане 0,19x0,06 м (рис. 1).

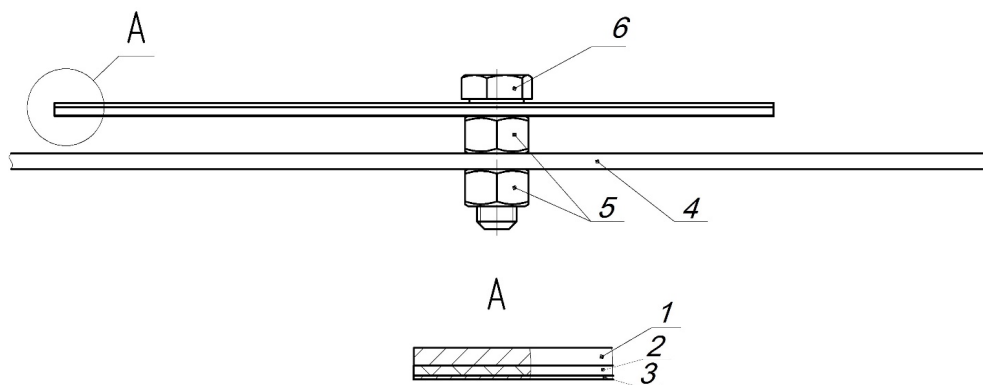


Рис. 1. Схема резонансного полосового вибропоглотителя:

1 – полоса; 2 – диссипативный слой; 3 – армирующий слой; 4 – демпфируемая пластина;
5 – гайка; 6 – болт

Диссипативным слоем АВП являлась полимерная пленка ВПС-2.5 из поливинилацетата толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м, а армирующим – стальная полоса толщиной $0,25 \cdot 10^{-3}$ м. Площадь покрытия составляла 85% площади стальной полосы, участки которой у крепления и у ее коротких кромок покрытием не облицовывались. Масса РПВ составляла без крепления 3,3% массы демпфируемой пластины. РПВ устанавливался на пластину с зазором относительно ее поверхности.

2. Результаты испытаний

Предварительно выполнялось определение вибрационных параметров стальной полосы и РПВ на ее основе с мало отличающейся длиной участков от крепления до коротких кромок: 90 и 100 мм. Эксперимент проводился с использованием электродинамического вибратора. Крепление полосы к имеющей резьбу головке (штоку) вибратора до и после облицовки ее АВП осуществлялось с помощью двух гаек.

Измерялись частотные спектры виброускорения головки вибратора – возбуждающего сигнала – и коротких кромок длинного и менее протяженного участков полосы при отсутствии АВП. Спектры содержали интенсивные максимумы с близкими частотами резонансных колебаний кромок участков полосы с мало отличающейся длиной.

После облицовки полосы армированным покрытием в спектрах вибрации у кромок был обнаружен лишь один широкополосный максимум с наибольшим уровнем на низшей резонансной частоте колебаний длинного (33 Гц) и короткого (38 Гц) участков вибропоглотителя, соответственно. Максимумы на последующих резонансных частотах колебаний участков в спектрах вибрации кромок РПВ практически отсутствовали.

Приведенные результаты свидетельствуют о больших потерях колебательной энергии в испытанном вибропоглотителе, обусловленных высокой эффективностью АВП и взаимодействием колебательных процессов в участках вибропоглотителя с отличающейся длиной.

Эффективность вибропоглотителя определялась при возбуждении демпфируемой пластины ударом с помощью малогабаритного вибромолотка, имеющего датчик силы. Измерялась входная вибровозбудимость пластины, под которой подразумевается уровень виброускорения A , м/с^2 , в точке действия силы F , выраженного в дБ относительно порогового значения 10^{-6} м/с^2 и соответствующего силе $F_0 = 1$ Н. Измерения входной вибровозбудимости ($20 \lg AF_0 / (F \cdot 10^{-6})$) на рисунках условно A/F , дБ) демпфируемой пластины выполнялись в следующих четырех точках: геометрический центр (ГЦ) (точка 1), пучность форм изгибных колебаний второй (точка 2) и третьей (точка 3)

резонансных частот, точка 4 на одинаковом расстоянии от ГЦ и одного из углов пластины.

Эффективность вибропоглопителя определялась превышением уровней A/F , дБ, при его отсутствии над измеренными в той же точке соответствующими уровнями при наличии устройства на пластине. Испытания проводились при креплении вибропоглопителя к пластине в ее геометрическом центре, а также в точках (условно), находящихся на одинаковом расстоянии от ГЦ и последовательно от точек 2, 3 и 4.

Измерения входной вибровозбудимости пластины выполнялись в третьоктавных и узкой ($\Delta f = 1$ Гц) полосах частот. Типичные третьоктавные спектры A/F , дБ, измеренные при отсутствии (кривая 1) и наличии (кривая 2) вибропоглопителя, приведены на рис. 2. Измерения выполнены в точке 3, соответствующей пучности третьей резонансной частоты пластины. Вибропоглотитель находился между точками 1 и 3. Обращаясь к рисунку, видим, что установка вибропоглопителя привела к значительному уменьшению третьоктавных уровней вибрации пластины в диапазоне низких и средних частот.

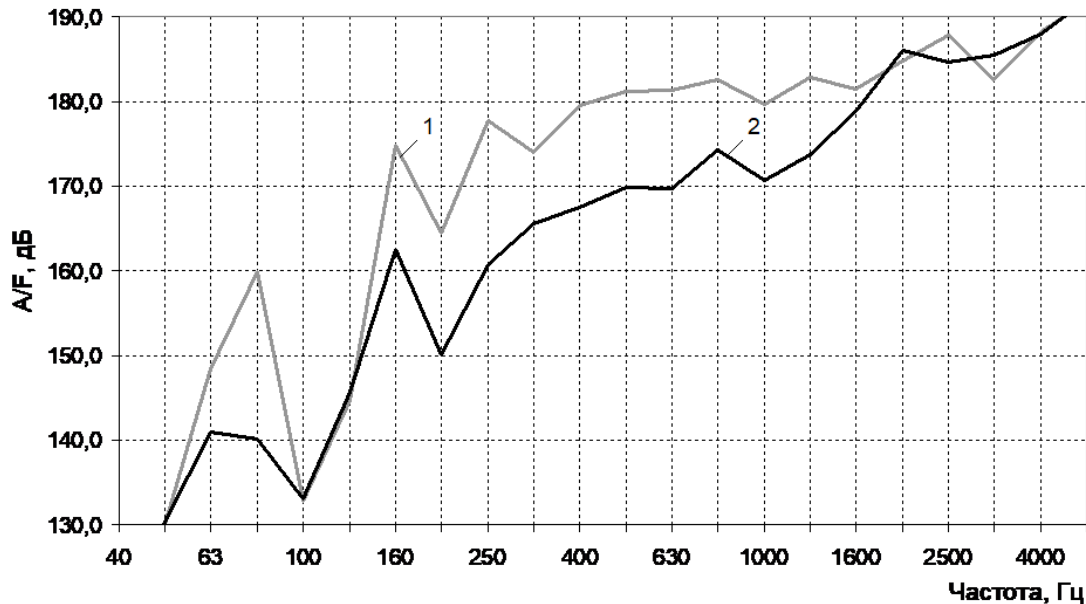


Рис. 2. Типичные третьоктавные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии (1) и наличии (2) вибропоглопителя

Наибольшие (до 20 дБ) величины снижения A/F зарегистрированы в полосах со среднегеометрическими частотами 80, 160, 200 и 250 Гц, содержащих максимумы вибрации пластины при ее возбуждении в точке 3 с резонансными частотами 72, 168, 185, 214 и 280 Гц (рис. 3).

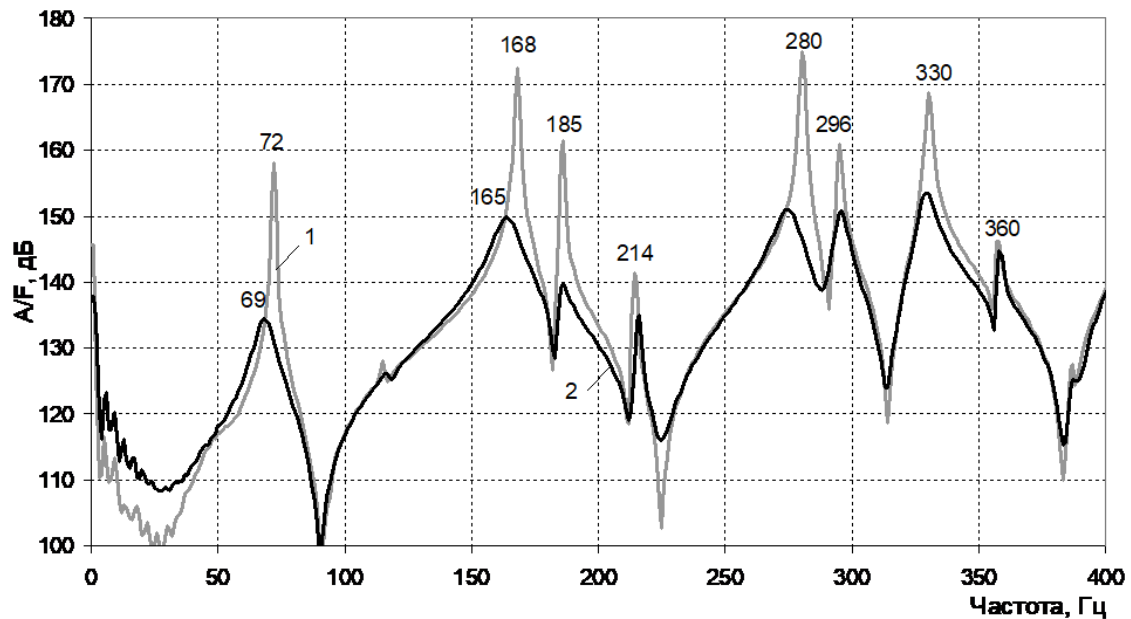


Рис. 3. Типичные узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии (1) и наличии (2) вибропоглотителя

Значения эффективности вибропоглотителя в третьоктавных полосах, полученные для каждого места его установки на пластину, были усреднены по четырем точкам ее возбуждения. Соответствующие значения эффективности вибропоглотителя приведены в нижеследующей таблице.

Таблица 1

Значения эффективности вибропоглотителя, дБ

Место установки	Среднегеометрические частоты третьоктавных полос, Гц																
	50	63	80	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
ГЦ пластины	0	9	19	0	4	2	10	6	4	8	2	8	5	4	5	0	0
Между ГЦ и т. 2	1	9	20	0	11	2	8	4	4	8	5	6	4	2	2	0	0
Между ГЦ и т. 3	0	8	19	0	4	7	9	12	3	8	7	9	4	5	6	1	0
Между ГЦ и т. 4	0	9	19	0	10	6	8	5	4	4	8	5	3	0	3	2	1
Средние значения	0	9	19	0	7	4	9	7	4	7	5	7	4	3	4	1	0

Обращаясь к таблице, видим, что независимо от места крепления вибропоглотителя его установка на пластину уменьшает уровни ее входной вибровозбудимости, усредненные по точкам измерения, в широком диапазоне частот, включающем кроме полосы 100 Гц (где отсутствует резонансный максимум) все третьоктавные полосы со среднегеометрической частотой от 63 до 1250 Гц. Наибольшая (19-20 дБ) эффективность вибропоглотителя зарегистрирована в полосе 80 Гц, в которую,

как ранее указывалось, попадает низшая резонансная частота (72 Гц) изгибных колебаний демпфируемой пластины. Отметим, что столь значительное снижение уровней вибрации пластины достигнуто с помощью частотно ненастроенного вибропоглотителя с низшей резонансной частотой его изгибных колебаний, значение которой примерно в 1,6 раза меньше значения указанной резонансной частоты колебаний пластины.

Заключение

В отличие от ранее испытанных РПВ с креплением в их ГЦ и высокой эффективностью только на частоте настройки, причем при условии крепления в зоне пучности соответствующей формы колебаний демпфируемой пластины, установка испытанного вибропоглотителя с относительной массой около 3% привела к уменьшению уровней ее вибрации в широком диапазоне частот с верхней границей, превосходящей значение низшей резонансной частоты вибропоглотителя более чем в 30 раз. Среднее значение эффективности вибропоглотителя по третьоктавным полосам 63, 80 и 125-1250 Гц равняется ~6 дБ.

Содержащиеся в статье результаты могут быть использованы при выборе размеров полосовых вибропоглотителей, предназначенных для эффективного виброгашения вибрации пластинчатых элементов корпусных и внутрикорпусных конструкций транспортных средств и оборудования различного функционального назначения в широком частотном диапазоне, включая низкие частоты.

Список литературы

1. Никифоров А.С. Акустическое проектирование судовых конструкций. Справочник. JL: Судостроение, 1990.
2. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. 2015. Вып. 6. С. 45-47.
3. Кирпичников В.Ю., Кощев А.П., Петров А.А., Савенко В.В. О низкочастотном вибродемпфировании пластины с большими потерями колебательной энергии // Труды Крыловского ГНЦ. 2021. Т. 1. Вып. 395.
4. Кирпичников В.Ю. Вред и польза резонансных явлений в элементах судовых конструкций. СПб.: 2019.
5. Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю., Шлемов Ю.Ф. Разработка новых высокоэффективных средств вибродемпфирования судовых конструкций. Труды Крыловского ГНЦ. 2019. Вып. 1 (387) С. 167-174.
6. Кирпичников В.Ю., Сятковский А. И., Шлемов Ю.Ф. Высокоэффективные средства низкочастотного вибродемпфирования с упругим элементом из полимерной пленки // Судостроение. 2020. Вып. 1. С. 44-47.

References

1. Nikiforov A.S. Acoustic design of ship structures. Directory. JL: Shipbuilding, 1990.
2. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibro-damping properties of polymer films // Shipbuilding. 2015. No. 6. S. 45-47.
3. Kirpichnikov V.Yu., Koshcheev A.P., Petrov A.A., Savenko V.V. On low-frequency vibration damping of a plate with large losses of vibrational energy // Proceedings of the Krylov State Research Center. 2021. Vol. 1. No. 395.

4. Kirpichnikov V.Yu. Harm and benefit of resonant phenomena in the elements of ship structures. St. Petersburg: 2019.

5. Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Smolnikov V.Yu., Shlemov Yu.F. Development of new highly effective means of vibration damping of ship structures. Proceedings of the Krylovsky SSC. 2019. No. 1 (387) S. 167-174.

6. Kirpichnikov V.Yu., Syatkovsky A.I., Shlemov Yu.F. Highly effective means of low-frequency vibration damping with an elastic element made of a polymer film // Shipbuilding. 2020. No. 1. S. 44-47.