

УДК: 628.517.4. 699.842

OECD: 2.03 PU

Экспериментальные исследования эффективности армированного вибропоглощающего покрытия и полосовых вибропоглощителей

Кирпичников В.Ю.¹, Смольников В.Ю.², Гришин А.А.³, Олейников А.Ю.^{4*}

¹Д.т.н., профессор, ²Инженер 1-ой категории,

³Ведущий инженер, ⁴К.т.н., доцент,

^{1,4}Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова,

^{2,3}ФГУП «Крыловский государственный научный центр»,

^{1,2,3,4}г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Выполнены экспериментальные исследования вибродемпфирования пластины с типичными размерами участка инженерных конструкций, расположенного между соседними подкрепляющими элементами. Целью исследований является определение величины эффективности армированного вибропоглощающего покрытия и различных вариантов резонансных полосовых вибропоглощителей с такой же и существенно меньшей, чем у армированных вибропоглощающих покрытий (АВП), площадью поверхности. Измерены частотные спектры вибрации возбуждаемой сосредоточенной силой пластины при отсутствии и наличии средств вибродемпфирования. Получены экспериментальные величины эффективности уменьшения уровней вибрации пластины испытанными средствами. Установлена меньшая на низких частотах, чем у АВП, эффективность групп малоразмерных одинаковых вибропоглощителей с такой же общей площадью, как у АВП. Получено, что одиночный полосовой вибропоглощитель малой площади, настроенный на конкретную резонансную частоту виброгашения пластины может иметь примерно такую же, как АВП, эффективность.

Ключевые слова: пластина, вибрация, средства вибродемпфирования, эффективность, армированное покрытие, полосовой вибропоглощитель

Experimental studies of the effectiveness of reinforced vibration-absorbing coating and strip vibration absorbers

Kirpichnikov V.Yu.¹, Smolnikov V.Yu.², Grishin A.A.³, Oleinikov A.Yu.^{4*}

¹DSc, Professor, ²1st category engineer,

³Lead engineer, ⁴PhD, Associate Professor,

^{1,4}Baltic State Technical University 'VOENMEH',

^{2,3}Federal State Unitary Enterprise 'Krylovsky State Scientific Center',

^{1,2,3,4}St. Petersburg, Russia

Abstract

Experimental studies of vibration damping of a plate with typical dimensions of a section of engineering structures located between adjacent reinforcing elements have been performed. The aim of the study is to determine the efficiency of a reinforced vibration-absorbing coating and various versions of resonant strip vibration absorbers with the same and significantly smaller than that of an reinforced vibration-absorbing

*E-mail: alexey.ole@gmail.com (Олейников А.Ю.)

coatings RVAC surface area. Frequency spectra of vibration excited by a concentrated force of a plate have been measured in the absence and presence of vibration damping means. Experimental values of the efficiency of reducing plate vibration levels by the tested means have been obtained. A lower efficiency at low frequencies than that of an RVAC has been established for groups of small-sized identical vibration absorbers with the same total area as that of an RVAC. It has been found that a single strip vibration absorber of a small area tuned to a specific resonant frequency of plate vibration damping can have approximately the same efficiency as an RVAC.

Keywords: plate, vibration, vibration damping means, efficiency, reinforced coating, strip vibration absorber

Введение

Разработка средств уменьшения уровней низкочастотной вибрации и обусловленного ею шумоизлучения различных инженерных конструкций, при невозможности улучшить акустические характеристики источника и в связи с малой эффективностью существующих средств защиты, имеет важнейшее практическое значение.

Одним из направлений соответствующих работ является повышение эффективности армированных вибропоглощающих покрытий (АВП), содержащих в качестве диссипативного слоя материал с большими потерями колебательной энергии при динамической деформации. Наилучшим вибропоглощением среди существующих материалов обладает поливинилацетат [1, 6].

Согласно многочисленным экспериментальным исследованиям АВП на основе полимерной пленки из поливинилацетата имеют большую, в сравнении с другими покрытиями, эффективность даже при существенно меньших, чем у них, толщине и массе [2]. Особенностью таких АВП является эффективная работоспособность в широком диапазоне частот колебаний инженерных конструкций, включая их низшие резонансные частоты.

Вместе с тем известно, что при наличии в спектре вибрации и шумоизлучения конструкции низкочастотного узкополосного максимума эффективными, при меньших размерах и массе, являются настроенные на ее частоту резонансные пластинчатые или полосовые вибропоглотители (РПВ), точечно закрепленные на демпфируемой конструкции с зазором от ее поверхности [3]. Жесткая пластинка (полоска) таких РПВ с одной или двух сторон облицовывается АВП на основе поливинилацетата и более тонкого, чем пластинка, армирующего слоя из жесткого материала. Настройка на нужную частоту достигается путем выбора размеров пластинки.

Помимо подобных РПВ несколько меньшей эффективностью виброгашения низкочастотных дискретных составляющих обладают частотно настроенные РПВ другого (условно второго) типа в виде пластинки из жесткого материала, закрепленной непосредственно (без зазора) на поверхности демпфируемой конструкции с помощью самоклеющейся полимерной пленки из поливинилацетата [4]. По сути, такого рода РПВ являются армированными вибропоглощающими покрытиями малой площади в сравнении с площадью демпфируемой конструкции.

Известно, что для достижения практически максимальной эффективности АВП их площадь должна составлять не менее 60–80% площади конструкций, на которые их устанавливают [5]. Нанесение АВП единым листом на указанную площадь пластины оказывается иногда невозможным, и его наносят частями. Определение сравнительной

эффективности указанных способов нанесения на пластину высокоэффективных АВП до настоящего времени не выполнялись.

Могут ли иметь такую же или большую, чем покрытия, эффективность группа РПВ второго типа, ненастроенных на конкретную резонансную частоту демпфируемой пластины и имеющих ту же, что покрытие площадь или резонансный полосовой вибропоглотитель настроенный на низкочастотную ДС и являющийся частью АВП с существенно меньшей, чем у покрытия площадью?

Также несомненный интерес имеет определение влияния различного состава резонансных частот одинаковых в группе вибропоглотителей на сравнительную эффективность групп с их разным количеством, имеющих одну и ту же суммарную площадь с покрытием.

Возможность расчетной оценки эффективности соответствующих средств вибропоглощения, из-за сложности учета их взаимодействия с демпфируемой пластиной и друг с другом при групповом размещении, в настоящее время отсутствует.

Получение ответов на соответствующие вопросы являлось основными задачами работы, результаты которой далее приводятся.

Работа выполнялась в два этапа. Первый этап был посвящен исследованиям эффективности нанесенного на 64% площади демпфируемой пластины АВП, с последующим его разрезанием, без демонтажа с пластины, на 4, 8 и 32 одинаковых по размерам части, каждая из которых являлась описанным РПВ второго типа. На втором этапе были выполнены исследования эффективности такой же разновидности одного и нескольких РПВ при их частотной настройке на одну из низших резонансных частот изгибных колебаний демпфируемой конструкции.

1. Демпфируемая конструкция, средства уменьшения уровней вибрации и шумоизлучения

Экспериментальные исследования были выполнены с использованием стальной пластины толщиной 10^{-3} м с размерами в плане $0,5 \times 0,5$ м. Пластина по кромкам крепилась к стальным уголкам прямоугольного каркаса и по сути являлась крышкой малогабаритного шумозаглушающего кожуха высотой 0,3 м со стальными пластинами боковых стенок и дна толщиной $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Возбуждение крышки (далее пластина) осуществлялось миниатюрным вибромолотком, содержащим датчик измерения величины возбуждаемой силы.

Измерялись уровни входной и переходной вибровозбудимостей пластины при отсутствии и наличии на ней средств вибропоглощения

$$A/F = 20 \lg(AF_0/\alpha F), \text{ дБ}, \quad (1)$$

где A – уровень виброускорения, м/с^2 ; F – возбуждающая сила, Н; α – пороговый уровень виброускорения, 10^{-6} м/с^2 ; $F_0 = 1$ Н.

Измерения выполнялись в трех точках, находящихся в геометрическом центре (ГЦ) пластины, а также на одинаковом расстоянии от ГЦ до одной из кромок и до одного из углов пластины.

Влияние на измеряемые уровни A/F вибрационных процессов и шумоизлучения боковых стенок и дна кожуха было исключено нанесением на их пластины высокоэффективного на низших резонансных частотах АВП, состоящего из стального листа толщиной 10^{-3} м и полимерной пленки марки ВПС-2,5 из поливинилацетата толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м. Наружная поверхность АВП на всех, кроме демпфируемой, пластинах была облицована эффективным на средних и высоких звуковых частотах

звукопоглощающим материалом толщиной $3 \cdot 10^{-2}$ м.

Была исследована эффективность следующих средств вибропоглощения:

- армированное вибропоглощающее покрытие с размерами в плане $0,4 \times 0,4$ м, содержащее полимерную пленку марки ВПС-2,5 толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м и армирующий стальной лист толщиной $\sim 0,5 \cdot 10^{-3}$ м;

- варианты групп РПВ, образованных последовательным разрезанием (без демонтажа) установленного на пластину вышеуказанного АВП со следующими размерами одинаковых в каждой группе частотно ненастроенных вибропоглотителей в плане и их количеством: $0,4 \times 0,098$ м, 4 вибропоглотителя РПВ1; $0,199 \times 0,098$ м, 8 вибропоглотителей РПВ2; $0,099 \times 0,048$ м, 32 вибропоглотителя РПВ3;

- вибропоглотитель РПВ4, частотно настроенный на низшую резонансную частоту изгибных колебаний пластины;

- вибропоглотитель РПВ5, частотно настроенный на резонансную частоту пластины с наибольшими уровнями ее изгибных колебаний и шумоизлучения.

Все описанные средства вибропоглощения размещались на наружной поверхности пластины, что упрощает их практическое применение при решении задачи улучшения акустических свойств шумозаглушающего кожуха.

Измерения выполнялись в низкочастотном диапазоне 0–400 Гц.

2. Эффективность покрытия и групп частотно ненастроенных вибропоглотителей

Пренебрегая взаимодействием вибропоглотителей в группах друг с другом, можно считать, что основным фактором, влияющим на их эффективность, как и на эффективность покрытия, является соотношение значений их резонансных частот f_p с резонансными частотами демпфируемой пластины $f_{пл}$.

Резонансные частоты пластины определялись с использованием узкополосных спектров ее входных и переходных вибровозбудимостей. В качестве примера на рисунке 1. приведен типовой спектр A/F , дБ, пластины, измеренный в ГЦ – точке ее возбуждения.

В диапазоне до 400 Гц по результатам измерений вибрации в трех точках было обнаружено 17 резонансных частот. Значения трех низших составили 55, 76 и 84 Гц. Наибольшие по частоте и сравнительно мало отличающиеся по точкам измерения уровни входных и переходных вибровозбудимостей были зарегистрированы на частоте 149 Гц. Частота изгибных колебаний пластины с формой, изображенной на рисунке 2, с высокой вероятностью совпала или оказалась близкой к низшей резонансной частоте колебаний воздушного объема кожуха.

Общее число и значения наиболее выраженных резонансных частот колебаний аналогов необлицованных полимерной пленкой армирующего листа и полос вибропоглотителей РПВ1–РПВ3 определялись при их возбуждении вибромолотком в ГЦ и измерении спектров воздушного шума (преимущественно псевдозвуковых давлений) микрофоном у ГЦ на расстоянии $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ м от стороны поверхности, обратной возбуждаемой.

Общее количество резонансных частот листа покрытия в диапазоне до 400 Гц составило 28. Низшая резонансная частота колебаний более тонкого, чем пластина, листа, несмотря на его меньшие размеры в плане, оказалась в сравнении с низшей резонансной частотой пластины (55 Гц) существенно более низкой (17,5 Гц). Наименьшее (до 2%) различие ближайших значений f_p и $f_{пл}$ было обнаружено лишь на частотах $f_{пл} \geq 149$ Гц.

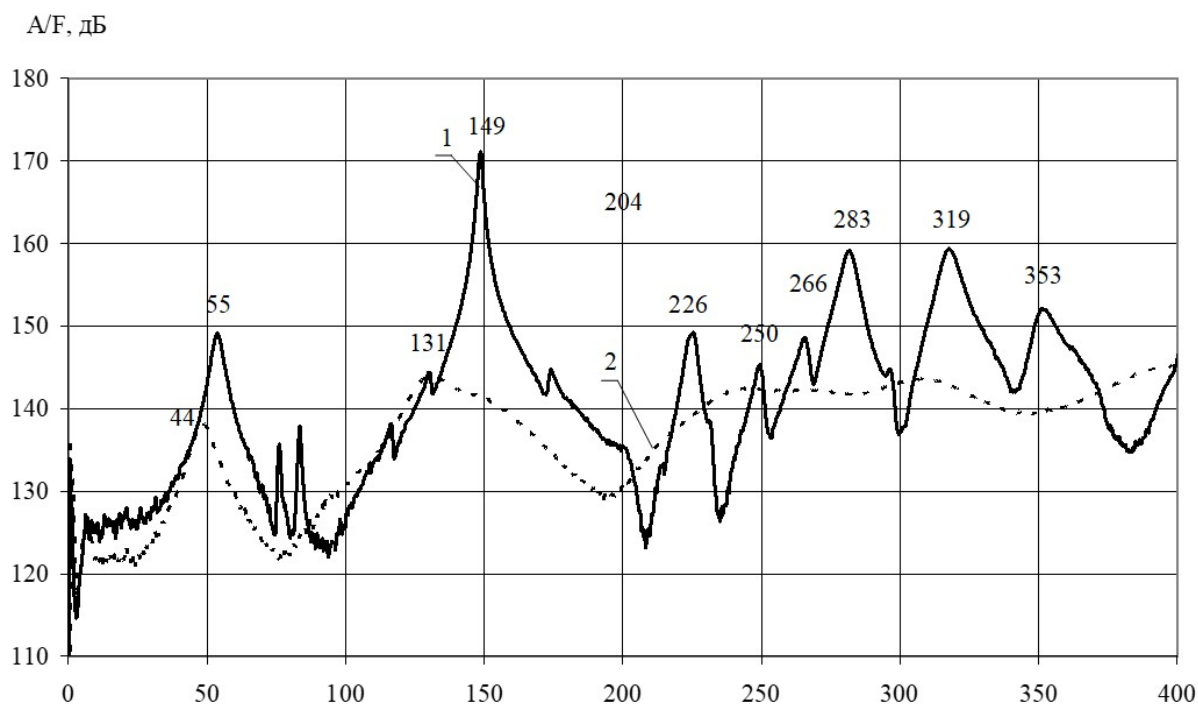


Рис. 1. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости в ГЦ пластины при
отсутствии (1) и наличии (2) покрытия

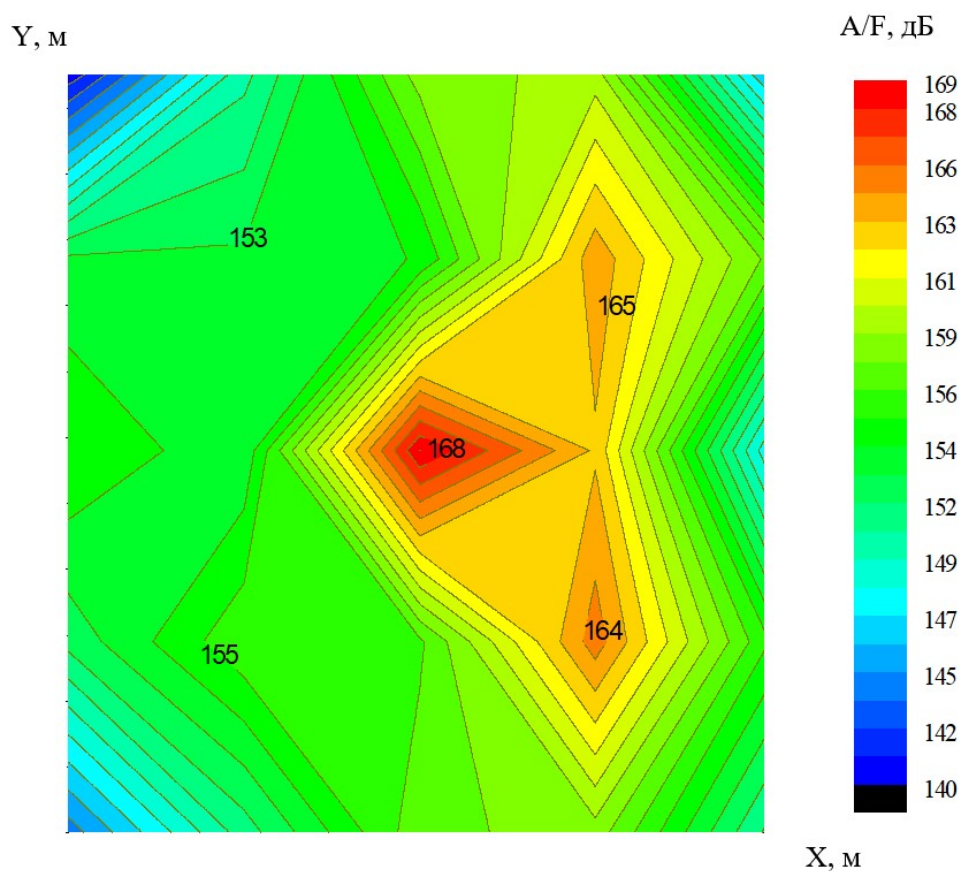


Рис. 2. Форма колебаний пластины на частоте 149 Гц

Низшие экспериментальные значения резонансных частот f_p полос вибропоглотителей РПВ1, РПВ2 и РПВ3 оказались равными 56, 82 и 313 Гц, а общее число резонансов в диапазоне до 400 Гц – девять, шесть и один соответственно. Значения низших резонансных частот полос двух первых РПВ практически совпали с первой и третьей резонансными частотами колебаний пластины. В спектрах вибрации пластины и вибропоглотителя РПВ3 были выявлены резонансные максимумы с близкими частотами 316 и 319 Гц. Значения других резонансных частот полос вибропоглотителей, как и большинства резонансных частот листа покрытия, отличались от ближайших резонансных частот пластины $f_{пл}$ на величину не менее, чем $0,03 f_{пл}$.

С учетом приведенной информации можно предположить, что эффективность групп вибропоглотителей РПВ1, РПВ2 и РПВ3 может быть больше эффективности покрытия на резонансных частотах пластины 55, 84 и 319 Гц соответственно. Типичные узкополосные ($\Delta f = 1$ Гц) спектры входной вибровозбудимости пластины при отсутствии и наличии покрытия, а также при наличии покрытия и трех групп вибропоглотителей приведены на рисунке 1 и рисунке 3 соответственно. Измерения выполнены в геометрическом центре пластины.

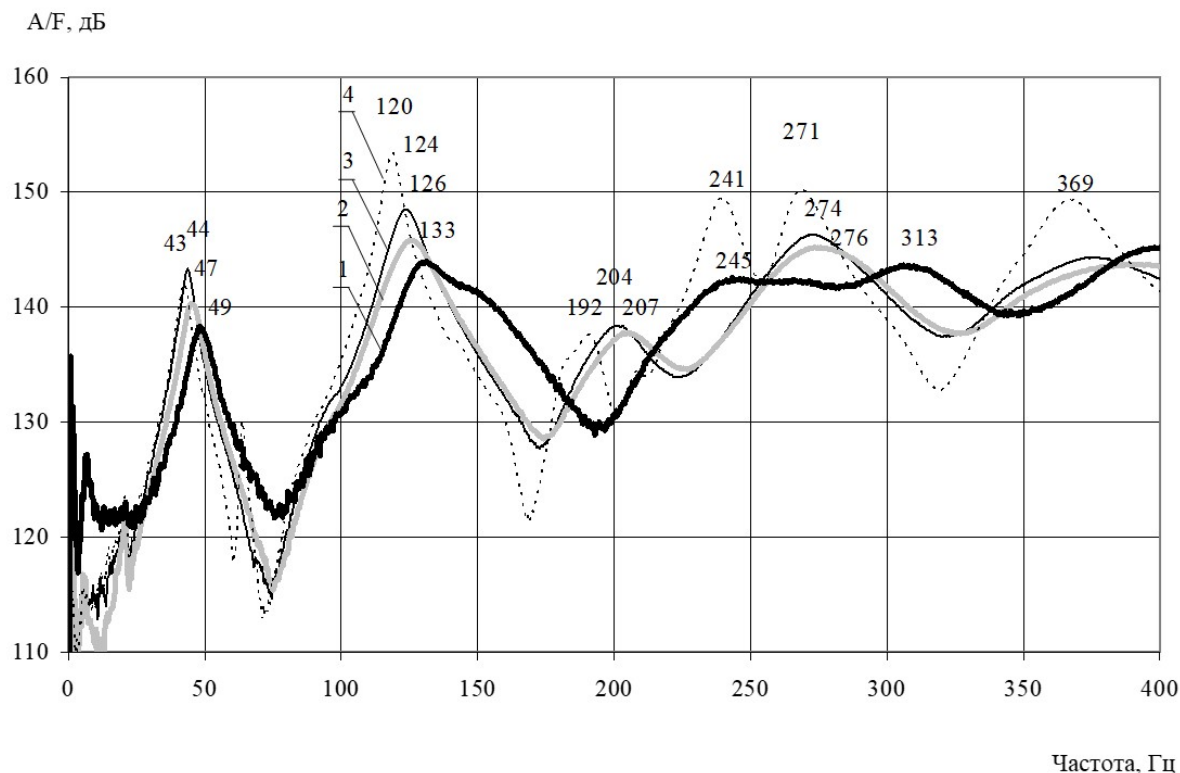


Рис. 3. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости в Гц пластины со средствами вибродемпфирования: 1 – полное АВП, 2 – группа АВП1, 3 – группа АВП2, 4 – группа РПВ3

Анализ измеренных узкополосных спектров входной и переходной вибровозбудимости пластины показал следующее:

- среднее по точкам измерения уменьшение уровней A/F покрытием на низшей резонансной частоте (55 Гц) колебаний пластины составило ~ 10 дБ; соответствующая эффективность на указанной частоте трех групп вибропоглотителей оказалась практически одинаковой и меньшей, чем эффективность покрытия, на 2–5 дБ;
- средняя по точкам измерения эффективность покрытия на резонансных частотах пластины 84 и 319 Гц составила 22 и 17 дБ соответственно и оказалась

меньше эффективности каждой группы РПВ на частоте 84 Гц на ~ 3 дБ и группы вибропоглощителей РПВ3 на частоте 319 Гц на ~ 10 дБ; на резонансных частотах пластины, соседних с резонансной частотой 319 Гц, эффективность вибропоглощителей РПВ3 оказалась на ~ 6 дБ меньше эффективности покрытия;

– на частоте 149 Гц с наибольшим уровнем резонансного максимума A/F колебаний пластины среднее значение эффективности покрытия (~ 26 дБ) превысило среднюю эффективность групп вибропоглощителей РПВ1, РПВ2 и РПВ3 на $\sim 2, 4$ и 9 дБ соответственно.

Средние, по измерительным точкам и наиболее выраженным ($A/F > 140$ дБ) резонансным максимумам вибрации пластины, величины эффективности покрытия $\Theta_{\text{п}}$, дБ, групп вибропоглощителей $\Theta_{\text{вп}}$, дБ, РПВ1, РПВ2 и РПВ3 составили примерно 18, 17, 16 и 13 дБ соответственно.

Расчетное значение $\Theta_{\text{п}}$, дБ, по приведенной ниже формуле (5), составило 20 дБ:

$$\Theta_{\text{п}} = 20 \lg(\mu/4,5) + 20 \lg(\eta/\eta_0) + 23, \text{ дБ} \quad (2)$$

где μ – относительная масса покрытия, %, $\mu = 36\%$; η – среднее по резонансным частотам A/F колебаний пластины значение коэффициента потерь, $\eta = 0,034$ ($\eta_0 = 0,003$).

Приведенная формула с введением поправки -3 дБ к расчетному значению может быть использована и для оценки эффективности $\Theta_{\text{вп}}$ групп вибропоглощителей.

Примерно такие же соотношения значений вибродемпфирующей эффективности покрытия и групп частотно ненастроенных на резонансные частоты демпфируемой пластины вибропоглощителей были получены при возбуждении пластины воздушным шумом, создаваемым установленным в кожухе громкоговорителем. При зарегистрированной средней (16 дБ) по резонансным частотам пластины эффективности покрытия аналогичная эффективность групп из 4, 8 и 32 вибропоглощителей оказалась равной 16, 13 и 10 дБ соответственно.

3. Эффективность покрытия и частотно настроенных на резонансные частоты пластины вибропоглощителей

Испытывались два типа вибропоглощителей: с низшей резонансной частотой колебаний, равной низшей резонансной частоте 55 Гц колебаний пластины (РПВ4) и частоте 149 Гц с наибольшим уровнем резонансного максимума в спектрах ее входной вибровозбудимости (РПВ5).

Выбор длины l вибропоглощителей с толщами стальной полосы и пленки ВПС-2,5, равными $0,5$ мм, осуществлялся с использованием формулы для низшей резонансной частоты изгибных колебаний полос (стержней) со свободными кромками

$$f_1 = \frac{3,57}{l^2} \sqrt{\frac{B}{m}}, \quad (3)$$

где B – изгибная жесткость $\text{Н} \cdot \text{м}^2$, $Eh^3b/12(1 - \sigma^2)$; E – модуль Юнга, $\text{Н}/\text{м}^2$; σ – коэффициент Пуассона; l – длина вибропоглощителей, м; m – масса единицы длины $\rho h b$ полосы, $\text{кг}/\text{м}$, ρ – плотность стали, $\text{кг}/\text{м}^3$; h и b – толщина и ширина полосы, м.

Размеры в плане двух вариантов вибропоглощителя РПВ4 и вибропоглощителя РПВ5 составляли $0,22 \times 0,045$ м, $0,22 \times 0,092$ м и $0,13 \times 0,035$ м соответственно.

Эффективность обоих типов вибропоглощителей определялась при их размещении в зоне ГЦ пластины, совпадающего с пучностью форм ее колебаний на частотах обоих гасимых резонансных максимумов вибрации.

На рисунке 4 приведены узкополосные спектры входной вибровозбудимости в ГЦ пластины в диапазоне от 25 до 75 Гц при отсутствии средств вибродемпфирования (кривая 1), а также при ее полной облицовке описанным покрытием (кривая 2), и при отдельной установке первого (кривая 3) и второго (кривая 4) вариантов РПВ4. Обращаясь к рисунку 4, видим, что установка указанных вариантов вибропоглотителя РПВ4 на пластину привела к уменьшению уровня ее гасимого резонансного максимума на частоте 55 Гц на 7 и 16 дБ соответственно. Укажем, что площадь и масса первого и второго варианта вибропоглотителя РПВ4 составляли примерно 4 и 2% площади и массы пластины и были существенно меньше соответствующих параметров АВП.

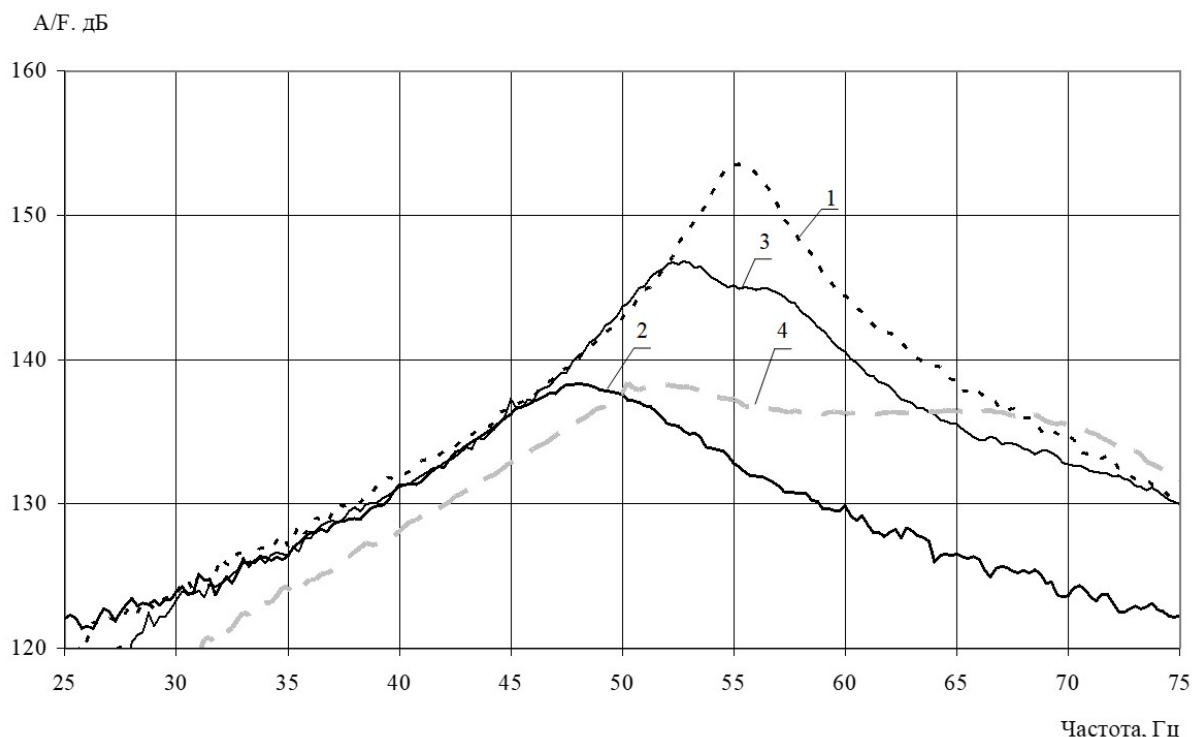


Рис. 4. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости пластины в ГЦ при отсутствии средств вибродемпфирования (1), при полной облицовке пластины покрытием (2) и при установке первого (3) и второго вариантов РПВ4 (4)

Отметим, что установка обоих вариантов вибропоглотителя РПВ4, настроенных на частоту 55 Гц, приводила к уменьшению уровней A/F и на других, более высоких, резонансных частотах. Совместная установка двух вариантов РПВ4 с общей относительной массой 6% привела, например, к снижению наиболее выраженного резонансного максимума на частоте 149 Гц на 12 дБ.

Эффективность уменьшения уровней резонансного максимума на частоте 149 Гц определялась также при установке одного и нескольких вибропоглотителей РПВ5. На рисунке 5 приведены узкополосные спектры входной вибровозбудимости в ГЦ пластины при отсутствии средств вибродемпфирования (кривая 1), при полной облицовке пластины покрытием (кривая 2) и при следующих вариантах установки на нее вибропоглотителя РПВ5: одного в ГЦ (кривая 3), одного в ГЦ и по одному в зоне двух других пучностей (кривая 4), а также двух в зоне ГЦ и по одному в зоне двух других пучностей (кривая 5).

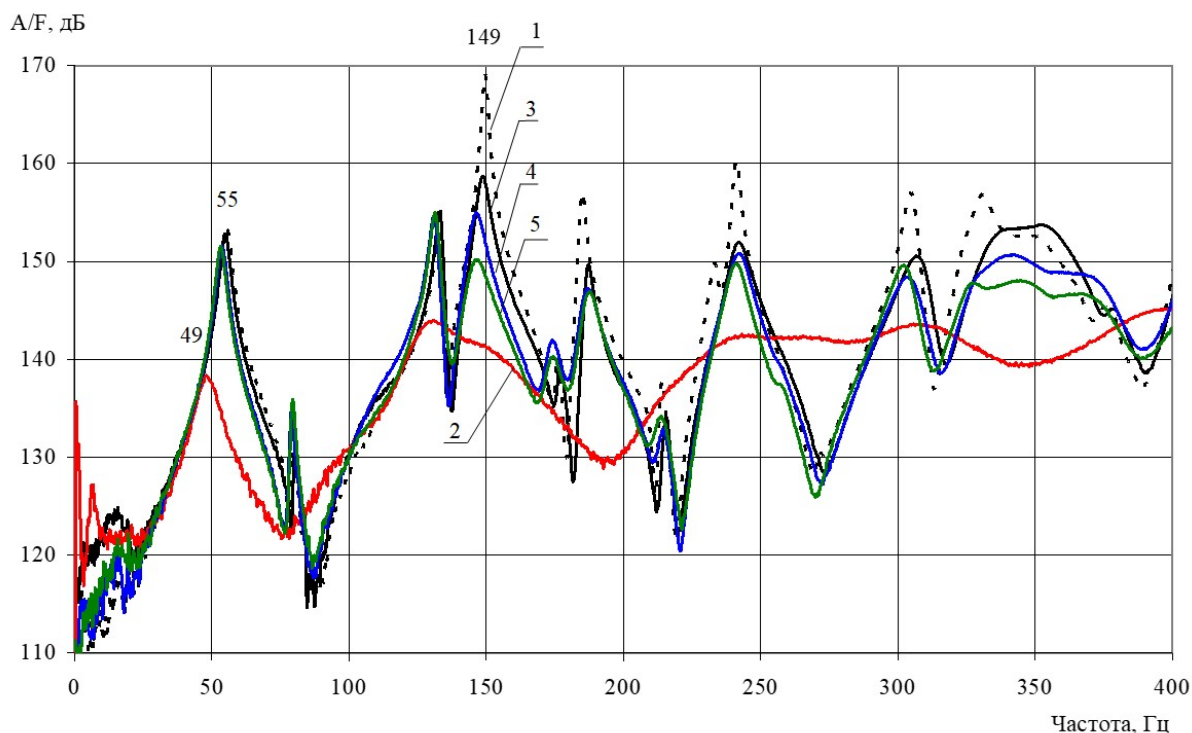


Рис. 5. Узкополосные спектры входной вибровозбудимости в ГЦ пластины при отсутствии средств вибродемпфирования (1), при установке АВП (2) и вариантов вибропоглотителя РПВ5: 3 – одного в зоне ГЦ; 4 – одного в зоне ГЦ и по одному в зоне двух других пучностей; 5 – двух в зоне ГЦ и по одному в зоне двух других пучностей

Обращаясь к рисунку 5, видим, что установка вибропоглотителя РПВ5 с указанными количеством и местом их расположения привела к снижению уровней резонансного максимума на частоте 149 Гц на 11, 15 и 19 дБ соответственно. При этом было зарегистрировано уменьшение в среднем на ~ 10 дБ уровней вибрации и на более высоких резонансных частотах. Отметим, что масса одиночного РПВ5 равнялась примерно одному проценту массы демпфируемой пластины и была меньше массы испытанного АВП примерно в 56 раз.

Заключение

К основным результатам работы отнесем следующие:

- установлено, что группы одинаковых по размерам и ненастроенных на конкретные резонансные частоты колебаний демпфируемой пластины вибропоглотителей с такой же как у АВП общей площадью имеют меньшую, чем АВП, эффективность; в низкочастотном диапазоне эффективность групп вибропоглотителей снижается при уменьшении их размеров (увеличение числа в группе); можно предположить, что нанесение покрытия на демпфируемую конструкцию частями приведет к большему ухудшению их эффективности на низких частотах при меньших размерах одинаковых частей;

- настроенные на конкретную резонансную частоту колебаний демпфируемой пластины вибропоглотители обеспечивают существенное (до 19 дБ) снижение уровней ее вибрации при значительно меньших размерах и массе, чем у покрытия с примерно такой же эффективностью; установка подобных вибропоглотителей приводит к снижению уровней максимумов вибрации также на трех-пяти более высоких резонансных частотах.

Список литературы

1. Алексеев С.А., Сятковский А.И. Вибродемпфирующие свойства полимерных пленок // Судостроение. - 2015. - N 16. - С. 43–46.
2. Кирпичников В.Ю., Савенко В.В., Смольников В.Ю. Малогабаритные средства вибродемпфирования толстолистовой пластинчатой конструкции // Труды Крыловского государственного научного центра. - 2024. – Т. 4, N 410. - С. 186–192.
3. Кирпичников В.Ю. Вибрация и шумоизлучение обтекаемых корпусных конструкций при резонансных и автоколебательных процессах. СПб., 2022. – 261 с.
4. Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю. Высокоэффективные малогабаритные резонансные полосовые вибропоглотители // Информационно-аналитический журнал «Радиоэлектронные технологии». - 2024. – N 1. - С. 55-64.
5. Смольников В.Ю., Кудачев А.В. Влияние места расположения вибропоглощающего покрытия на его эффективность // Защита от повышенного шума и вибрации : сборник докладов, Санкт-Петербург, 21–23 марта 2017 года. – СПб.: Балтийский государственный технический университет «Военмех», 2017. - С. 475-479.
6. Канев Н.Г. Собственные частоты колебаний пластины на упругом основании винклеровского типа // Научный Журнал «Noise Theory and Practice». - 2020. – Т. 6, N 2. - С. 28-35.

References

1. Alekseev S.A., Syatkovsky A.I. Vibration damping properties of polymer films // Shipbuilding. - 2015. - N 16. - P. 43–46.
2. Kirpichnikov V.Yu., Savenko V.V., Smolnikov V.Yu. Small-sized means of vibration damping of a thick-sheet plate structure // Proceedings of the Krylov State Research Center. - 2024. – Vol. 4, N 410. - P. 186–192.
3. Kirpichnikov V.Yu. Vibration and noise emission of streamlined hull structures during resonant and self-oscillating processes. St. Petersburg, 2022. - 261 p.
4. Kirpichnikov V.Yu., Smolnikov V.Yu. Highly efficient small-sized resonant band vibration absorbers // Information and analytical journal 'Radioelectronic technologies'. - 2024. – N 1. - P. 55-64.
5. Smolnikov V.Yu., Kudaev A.V. Influence of the location of the vibration-absorbing coating on its effectiveness // Protection from increased noise and vibration : collection of reports, St. Petersburg, March 21-23, 2017. St. Petersburg: Baltic State Technical University 'Voenmeh', 2017, - P. 475-479.
6. Kanev N.G. Natural frequencies of oscillations of a plate on an elastic foundation of the Winkler type // Scientific Journal 'Noise Theory and Practice'. - 2020. – Vol. 6, N 2. - P. 28-35.