

Эпоксидные покрытия для повышения жесткости армирующих слоев трехслойных вибродемпфирующих материалов с полимерными пленками с высокими диссипативными свойствами

Epoxy coatings for stiffening of reinforcing layers of three-layer vibration-damping materials with polymer films with high dissipative properties

А.И. СЯТКОВСКИЙ¹, И.Д. СИМОНОВ-ЕМЕЛЬЯНОВ², В.Ю. КИРПИЧНИКОВ³

A.I. SYATKOVSKIY¹, I.D. SIMONOV-EMEL'YANOV², V.YU. KIRPICHNIKOV³

¹ ОАО «Пластполимер», Санкт-Петербург, Россия

² «МИРЭА – Российский технологический университет» (Институт тонких химических технологий имени М. В. Ломоносова), Москва, Россия

³ ФГУП «Крыловский государственный научный центр, Санкт-Петербург, Россия

¹ JSC Plastpolymer, St. Petersburg, Russia

² «MIREA – Russian Technological University» (Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow, Russia

³ FGUP Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

nauka@plastpolymer.com

Представлены результаты исследования эффективности армированного вибропоглощающего покрытия на основе поливинилацетатной пленки со сверхвысокими диссипативными свойствами и армирующего слоя из алюминиевой фольги, усиленной эпоксидным покрытием. Показано, что эпоксидное покрытие обеспечивает армирующим трехслойным вибродемпфирующим материалам улучшение демпфирующих свойств на 12–15 дБ в широком частотном диапазоне и позволяет наносить их на сложные криволинейные поверхности различных конструкций.

Ключевые слова: поливинилацетатная пленка, эпоксидные смолы, армирующие покрытия, демпфирующие свойства

The results of a study of the effectiveness of reinforced vibration-absorbing coating based on a polyvinyl acetate film with ultra-high dissipative properties and a reinforcing layer of aluminum foil reinforced with an epoxy coating are presented.

Keywords: polyvinyl acetate film; epoxy resins, reinforcing coatings, damping properties

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-04-67-69

Снижение уровней вибрации и шумоизлучения конструкций является актуальной задачей улучшения акустических характеристик транспортных средств и различного рода инженерных сооружений. Одним из основных путей решения этой задачи является облицовка конструкций вибропоглощающими покрытиями. Наиболее широкое применение находят армированные вибропоглощающие покрытия (АрВП), представляющие собой диссипативный слой вязкоупругого полимерного материала, на одну из поверхностей которого наносится армирующий слой металла. В собранном виде АрВП представляет собой разновидность трехслойной конструкции вида металл-полимер-металл (М–П–М), в которых вязкоупругий полимерный слой распределен между жесткими упругими слоями металлов или жестких пластмасс [1, 2]. Установлено, что эффективность диссипации энергии при изгибных колебаниях (демпфировании) в М–П–М структурах прямо пропорциональна η – коэффициенту механических потерь вязкоупругого полимерного слоя [2, 3]. Армирующий слой при этом изготавливают преимущественно из металлических листов различной толщины с высоким модулем при изгибе. При этом было установлено, что эффективность демпфирования существенно зависит от массы армирующего слоя и его изгибной жесткости [4].

На практике достаточно часто возникают проблемы демпфирования поверхностей конструкций, имеющих криволинейную форму, например, трубопроводов, балок различного поперечного сечения и т.д. В этой ситуации могут возникать определенные сложности с обеспечением контакта АрВП с обладающей криволинейной поверхностью из-за недостаточной гибкости внешнего армирующего листа. В то же время использование армирующего листа с толщиной менее 0,1 мм приводит к снижению его массы и жесткости, что ведет к снижению эффективности демпфирования.

Основной задачей является разработка АрВП, способного после нанесения покрытия «повторять» криволинейную форму демпфируемой поверхности.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования эффективности двухслойного АрВП, состоящего из вибропоглощающей термопластичной пленки ВПС-2,5, нанесенной на фольма-ткань толщиной 0,02 мм в качестве армирующего слоя. Для придания армирующему слою необходимой жесткости внешний слой фольма-ткани после нанесения покрытия на демпфируемую поверхность покрывали слоем эпоксидной смолы ЭД-20 с последующим отверждением. Толщина слоя эпоксидной смолы составляла около 1 мм.

Экспериментальная часть

В качестве внутреннего вязкоупругого полимерного слоя использовали вибропоглощающую пленку марки ВПС-2,5 из пластифицированного поливинилацетата (ПВА, ТУ 4515-001-00203521-93). Исследование эффективности диссипации энергии в М–П–М структурах выполняли на специальном стенде с использованием стальной пластины с размерами $1 \times 0,75 \times 1 \cdot 10^{-3}$ м [4].

Покрытия АрВП получали в два этапа:

- на этапе 1 получали двухслойный материал, состоящий из вибропоглощающей пленки ВПС-2,5 (ТУ 4515-001-00203521-93) толщиной 0,5 мм, нанесенной из расплава на фольма-ткань СФ (280–20) (ТУ 5760-002-11844652–2016). Такой самоклеящийся двухслойный материал обладает достаточной гибкостью и способен плотно крепиться клеевой стороной на криволинейную демпфируемую поверхность, обеспечивая надежный контакт;
- на этапе 2 внешнюю поверхность фольма-ткани для придания жесткости покрывали слоем смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА (ГОСТ 10587–84). Время отверждения при 20°C составляет около 36 часов.

Измерения входной вибровозбудимости пластин и расчет коэффициентов механических потерь η на резонансных частотах выполняли на специальном стенде по методике, описанной в [4, 5]. Измерения проводили на демпфируемой пластине в точках, указанных на рис. 1.

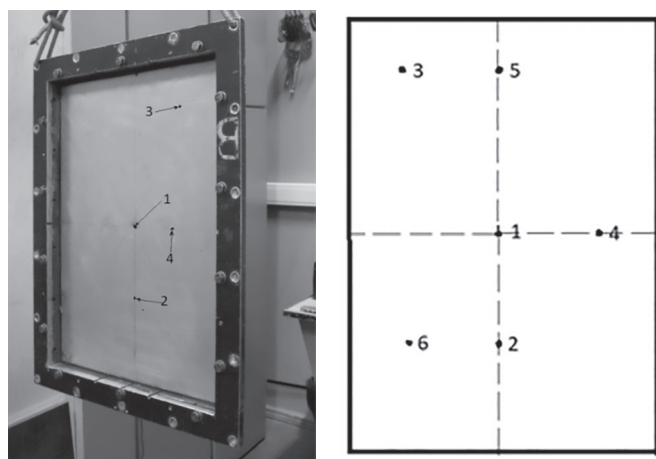


Рис. 1. Демпфируемая пластина на испытательном стенде с указанием точек, в которых проводили измерения входной вибровозбудимости.

Результаты работы и их обсуждение

Проведенные в работе [5] исследования зависимости эффективности демпфирования АрВП от толщины и жесткости армирующего слоя показали, что независимо от толщины вибропоглощающего слоя из пленки ВПС-2,5, при толщинах армирующего слоя из алюминиевой фольги существенно меньших, чем 0,2 мм, средняя эффективность демпфирования в диапазонах частот от 1 до 1600 Гц не превышает 5–7 дБ.

Обработка внешней поверхности армирующего слоя из тонкой алюминиевой фольги эпоксидной смолой с отвердителем существенно увеличивает демпфирующие свойства покрытия.

На рис. 2 в качестве примера представлены узкополосные ($\Delta f = 0,25$ Гц) спектры входной вибровозбудимости A/F (дБ) пластины без покрытия и пластины с эпоксидным покрытием, измеренные в соответствующих точках, в диапазоне частот от 1 до 200 Гц.

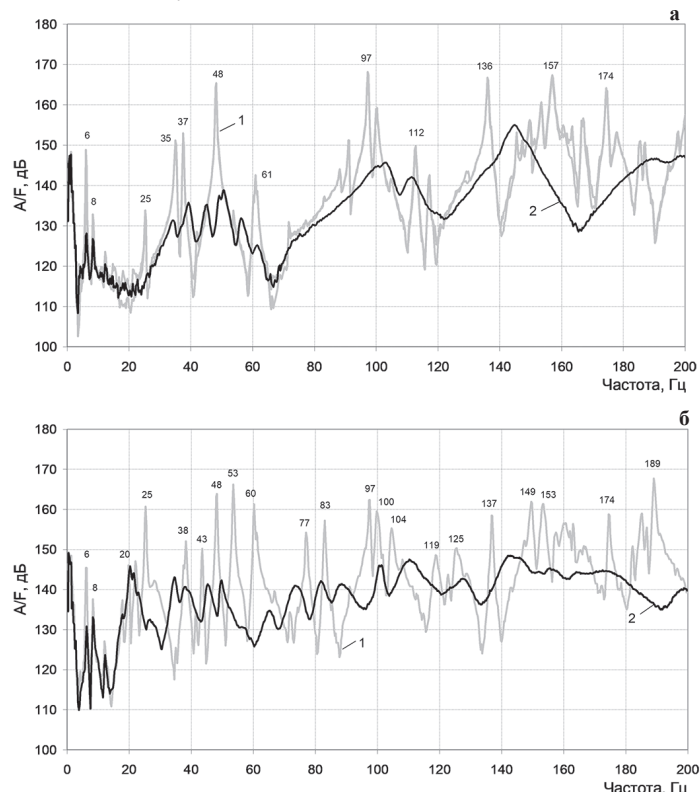


Рис. 2. Спектры входной вибровозбудимости пластин без покрытия (кривая 1) и с эпоксидным покрытием (кривая 2). Измерения в точке 1 (рис. 2а) и в точке 4 (рис. 2б) (Обозначения и расположение точек измерения приведены на рис. 1).

Спектры входной вибровозбудимости обеих пластин (рис. 2) содержат в диапазоне, ограниченном сверху частотой 200 Гц, достаточно большое число резонансных максимумов. Наибольшие уровни A/F пластины без покрытия зарегистрированы в точках 1, 2, 3 и 5 на резонансных частотах 37, 43, 48, 60, 88, 91, 97, 117, 136, 157, 166 и 182 Гц. Уровни резонансных максимумов на тех же или близких частотах в спектрах вибровозбудимости пластины с эпоксидным покрытием оказались существенно более низкими (до 20 дБ). Нанесение тонкого двухслойного покрытия на пластину привело к уменьшению уровней её входной вибровозбудимости на указанных частотах в среднем на величину около 15 дБ.

Примерно такая же эффективность покрытия в низкочастотном диапазоне была получена расчётно-экспериментальным методом с определением коэффициента потерь η колебательной энергии в пластинах [6]. Средние по частоте значения η в исходной (η_0) и с эпоксидным покрытием (η_1) пластинах оказались равными примерно $3 \cdot 10^{-3}$ и $4,5 \cdot 10^{-2}$, соответственно. Расчётная величина эффективности покрытия $\Xi = 20 \lg(\eta_1/\eta_0)$ составила около 23 дБ.

Спектры входной вибровозбудимости в тех же точках измерения, соответствующие частотному диапазону от 200 до 800 Гц, обобщены на рис. 3.

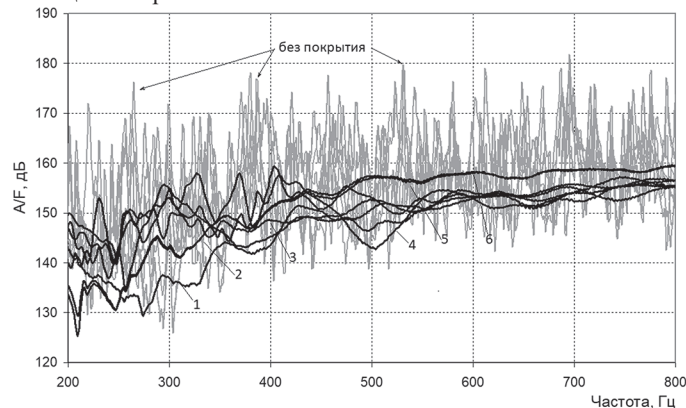


Рис. 3. Спектры входной вибровозбудимости пластины без покрытия и с эпоксидным покрытием, снятые в шести различных точках пластины (обозначения на рис. 1).

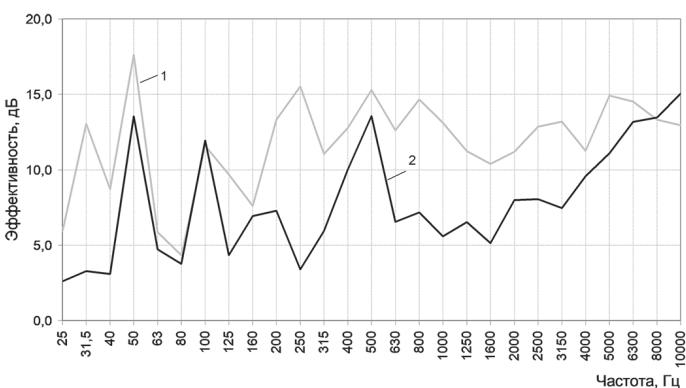


Рис. 4. Частотные характеристики эффективности АрВП по входной вибровозбудимости (кривая 1) и по звуковому давлению (кривая 2). Измерения в точке 1 (см. рис. 1).

Аналогичные частотные спектры входной вибровозбудимости были получены и для частотного интервала от 800 до 12000 Гц. В обоих частотных диапазонах средняя по резонансным частотам эффективность демпфирования покрытия составила около 15 дБ.

На рис. 4 представлены частотные характеристики эффективности тонкого двухслойного покрытия, полученные с использованием результатов измерений третьоктавных спектров входной вибровозбудимости в точке 1 (кривая 1) и звукового давления [6] на расстоянии 1 м от той же точки (кривая 2). Средняя по двадцати семи третьоктавным полосам со среднегеометрическими частотами от 25 до 10000 Гц величина эффективности по входной вибровозбудимости и звуковому давлению оказалась равной примерно 12 дБ и 7 дБ соответственно.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности значительного уменьшения уровней вибрации и звукоизлучения тонкостенных пластинчатых конструкций с помощью АрВП малой

толщины на основе вибропоглощающей пленки ВПС-2,5 и армирующего слоя из фольма-ткани, усиленной покрытием из эпоксидной смолы. Предложенный метод может быть использован для изготовления АрВП, предназначенных для виброзащиты конструкций со сложной криволинейной поверхностью.

Литература

1. Handbook of Noise and Vibration Control. Edited by Malcolm J. Crocker. John Wiley & Sons. Inc. 2007. P.1567. ISBN: 0471395994.
2. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний / пер. с англ. Л.Г. Корнейчука / под ред. Э.И. Григолока. М.: Мир. 1988. 448 с. ISBN 5-03-001138-2.
3. Nakra B.C. Vibration control in machines and structures using viscoelastic damping // Journal of Sound and Vibration.1998. Vol. 211. N3. PP. 449–465.
4. Кирпичников В.Ю., Кошечев А.П., Сятковский А.И. Экспериментальные исследования эффективности армированных вибропоглощающих покрытий // Журнал прикладной механики и технической физики. 2022. №1. С. 65–70. DOI: 10.15372/PMTF20220109.
5. Кирпичников В.Ю., Кошечев А.П., Сятковский А.И. Исследование эффективности металл-полимерных вибропоглощающих покрытий с тонким армирующим слоем // Журнал прикладной механики и технической физики. 2020. Т. 61, №6, С. 70–74. DOI: 10.15372/PMTF20200609.
6. Кирпичников В.Ю. Резонансная вибрация и звукоизлучение инженерных конструкций: учебное пособие. СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2023. 239 с. ISBN 978-5-00221-040-4.