

Влияние вязкоупругого полимерного слоя на эффективность диссипации энергии в трехслойных композитах металл-полимер-металл

Effect of viscoelastic layer on energy dissipation efficiency in three-layer metal-polymer-metal composites

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 (МИТХТ), Москва, Россия

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

¹ Plastpolymer JSC, St. Petersburg, Russia

² MIREA – Russian Technological University (MITHT), Moscow, Russia

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

nauka@plastpolymer.com

Представлены результаты экспериментального исследования сравнительной эффективности диссипации колебательной энергии в материалах слоистой структуры металл-полимер-металл (М–П–М) с различной толщиной полимерного слоя. Показано, что, если толщина полимерного слоя существенно меньше толщины металлического слоя, то она незначительно влияет на эффективность диссипации энергии в М–П–М структурах. Кроме того, вибропоглощающая пленка ВПС–2,5 демонстрирует высокую диссипацию колебательной энергии в М–П–М структурах в диапазонах частот от 1 до 6000 Гц, включая низкие частоты ($f \leq 200$ Гц), даже при толщине 0,2 мм.

Ключевые слова: пластифицированные пленки, поливинилацетат, трехслойные композиты, диссипативные свойства

The results of experimental study of comparative efficiency of vibrational energy dissipation in materials of metal-polymer-metal (M–P–M) layered structure with different thickness of polymer layer are presented. It is shown that if the thickness of the polymer layer is significantly less than the thickness of the metal layer, it has little effect on the efficiency of energy dissipation in M–P–M structures. In addition, the vibration-absorbing film VPS-2.5 demonstrates high dissipation of vibrational energy in M–P–M structures in the frequency ranges from 1 to 6000 Hz, including low frequencies ($f \leq 200$ Hz) even at a thickness of 0.2 mm.

Keywords: plasticized films, polyvinyl acetate, three-layer composites, dissipative properties

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-03-15-17

Одной из наиболее эффективных технологий вибродемпфирования является использование армированных и композитных материалов слоистой структуры, в которых вязкоупругие полимерные слои распределены между жесткими упругими слоями металлов или жестких пластмасс. Жесткие слои, изготавливаемые из конструкционных материалов, воспринимают силовые воздействия, в то время как мягкие слои из вязкоупругих эластичных полимерных материалов (ВЭПМ) обеспечивают диссипацию энергии за счет сдвиговых деформаций, возникающих при изгибных колебаниях в композитной структуре [1]. Наибольшее распространение получили трехслойные конструкции, состоящие из двух жестких несущих слоев металла и обеспечивающего их совместную работу внутреннего мягкого слоя полимера (М–П–М). Вязкоупругий полимер мягкого слоя характеризуется низким модулем сдвига, обеспечивающим высокую сдвиговую податливость трехслойной конструкции, присущую всем работающим на изгиб многослойным структурам. Увеличение толщины вязкоупругого полимерного слоя приводит к снижению жесткости конструкции, что нежелательно, а в ряде случаев – и абсолютно недопустимо.

Рациональный выбор вязкоупругого полимера для мягкого слоя, его толщины и расположения среди армирующих слоев позволяет увеличить демпфирование слоистой структуры по сравнению с однородной конструкцией близкой массы, жесткости и несущей способности [1–3].

Установлено, что эффективность диссипации энергии при изгибных колебаниях (демпфирования) в М–П–М структурах практически прямо пропорциональна η – коэффициенту механических потерь вязкоупругого полимерного слоя [3, 4]. Влияние толщины вязкоупругого слоя на эффективность демпфирования зависит от

соотношения толщин вязкоупругого и армирующих слоев, а также от вида полимерного материала внутреннего слоя. С увеличением толщины внутреннего полимерного слоя вибропоглощающие свойства М–П–М композитов, как правило, возрастают [5, 6]. Однако для некоторых полимерных материалов в «сэндвичевых» структурах наблюдается нарушение этой закономерности, высокие демпфирующие свойства достигаются и при малых соотношениях толщин полимерного и армирующих слоев. Более того, в некоторых М–П–М композитах коэффициент η возрастает при уменьшении толщины полимерного слоя [6, 7]. Способность полимерных пленок проявлять высокие вибропоглощающие свойства в тонких слоях чрезвычайно важна для создания всех слоистых демпфирующих материалов, так как обеспечивает возможность эффективного вибродемпфирования, с одной стороны, и сохраняет достаточно высокий уровень жесткости конструкции, с другой [1, 8].

Целью настоящей работы является изучение влияния толщины вязкоупругого слоя на основе пластифицированной пленки из поливинилацетата (ПВА) марки ВПС–2,5 на эффективность демпфирования колебаний в широком частотном диапазоне от 1 до 10000 Гц в М–П–М материалах.

Экспериментальная часть

В качестве внутреннего вязкоупругого полимерного слоя использовали пленку ВПС–2,5 из пластифицированного ПВА (ТУ 4515-001-00203521-93).

Исследование эффективности диссипации энергии в М–П–М структурах выполняли с использованием четырех однородных стальных пластин с размерами $1 \times 0,75 \times 4 \cdot 10^{-3}$ м. Одна из пластин использовалась в качестве контрольной, а на каждую из трех остальных наносилось армированное покрытие, состоящее из арми-

рующего металлического листа толщиной 0,6 мм и пленки ВПС–2,5 различной толщины: 1,5 мм, 0,6 мм и 0,2 мм.

Измерения входной вибровозбудимости пластин и расчет коэффициентов механических потерь на резонансных частотах выполняли по методике, описанной в работе [9].

Результаты работы и их обсуждение

На рис. 1 приведены типичные спектры входной вибровозбудимости М–П–М пластин с плёнкой ВПС–2,5 разной толщины. Измерения были выполнены в геометрическом центре пластин. В результате анализа полученных данных было установлено, что уровни входной вибровозбудимости М–П–М пластины с полимерной плёнкой толщиной 1,5 мм меньше соответствующих уровней вибровозбудимости М–П–М пластин с плёнкой толщиной 0,6 мм и 0,2 мм, не более чем на 3 дБ и 5 дБ, соответственно. Этот вывод справедлив для всего интервала частот от 1 до 6000 Гц.

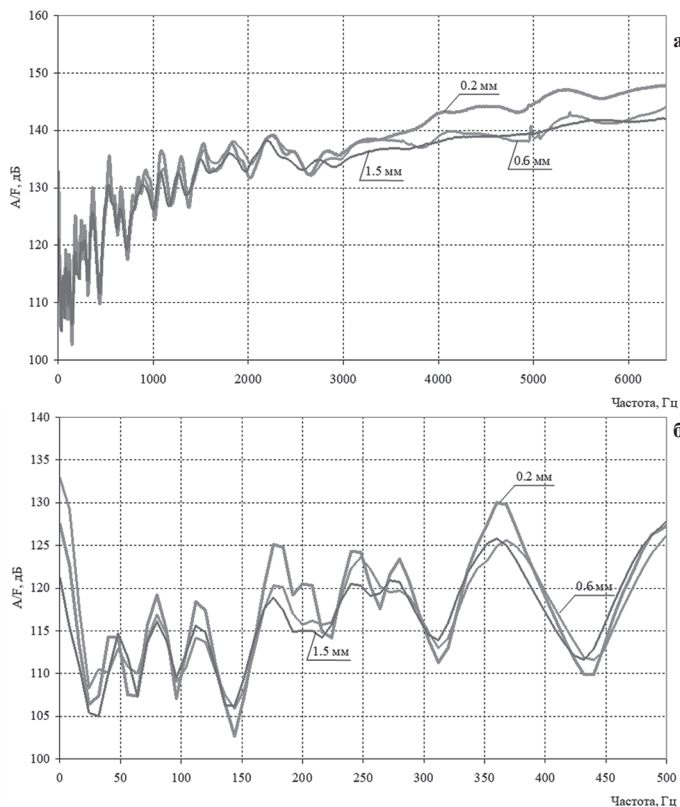


Рис. 1. Спектры входной вибровозбудимости М–П–М пластин с различной толщиной пленки ВПС–2,5 в интервале частот от 1 до 6000 Гц (а) и детализированная область спектра от 1 до 500 Гц (б). Толщина пленки указана на рисунке.

На резонансных частотах изгибных колебаний уровни входной вибровозбудимости для всех М–П–М пластин были намного ниже соответствующих уровней, зарегистрированных при испытаниях контрольной пластины (без покрытия).

На рис. 2 приведены типичные спектры входной вибровозбудимости контрольной пластины (кривая 1) и М–П–М пластины с наименьшей толщиной (0,2 мм) диссипативного слоя из пленки ВПС–2,5 (кривая 2). Композитная пластина с толщиной диссипативного слоя 0,2 мм имеет максимальные уровни вибрации в среднем на 18 дБ (частоты ниже 500 Гц) и на 25 дБ (частоты выше, чем 500 Гц) меньше по сравнению с контрольной пластиной.

На рис. 3 приведены частотные зависимости коэффициента потерь η колебательной энергии пластин, облицованных вибропоглощающими покрытиями (ВПП). Значения η получены с использованием метода определения резонансных максимумов в спектрах входной вибровозбудимости [9]. Вычисленные на резонансных частотах конкретной пластины величины η соединены штриховой линией.

Анализ данных, приведенных на рис. 3, показал, что значения η для М–П–М пластин с различной толщиной пленки (от 0,2 до 1,5 мм) различаются незначительно (не более чем в 1,5 раза). На частотах трёх низших резонансных максимумов значения коэффициента η изменяются в диапазоне от 0,15 до 0,38. На более

высоких частотах средняя для всех пластин величина η составляет примерно 0,12. На всех частотах значение коэффициента потерь колебательной энергии в контрольной пластине составляет 0,001 [9], что в 100 раз меньше этого показателя для М–П–М композитов.

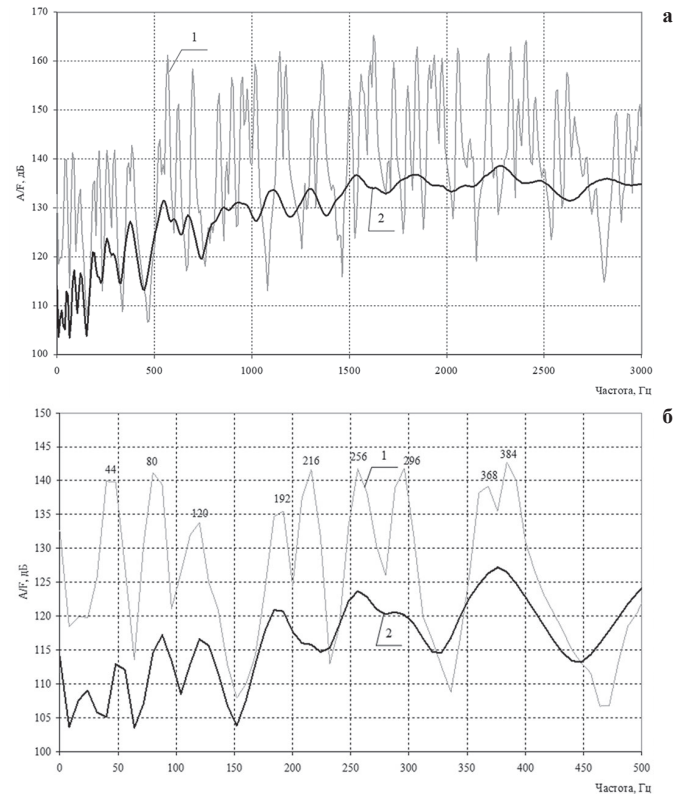


Рис. 2. Спектры входной вибровозбудимости контрольной пластины (кривая 1) и М–П–М пластины с толщиной пленки 0,2 мм (кривая 2) в интервале частот от 1 до 3000 Гц (а) и детализированная область спектра от 1 до 500 Гц (б).

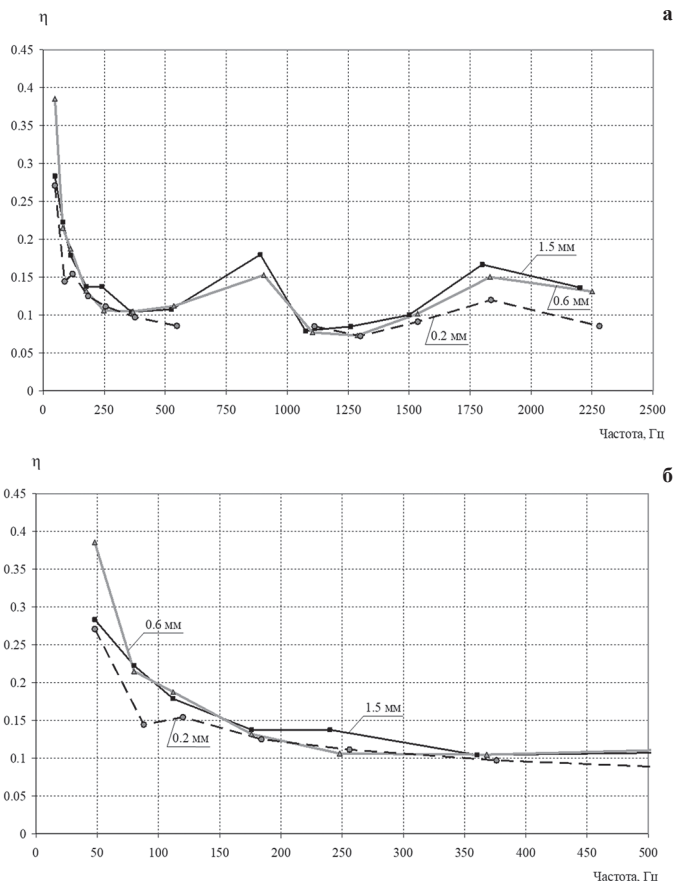


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента потерь колебательной энергии η в М–П–М пластинах с различной толщиной вибропоглощающего слоя (а); детализированная область спектра от 1 до 500 Гц (б). Толщины пленок указаны на рисунке.

Выводы

Толщина вибропоглощающего слоя (0,2–1,5 мм) из пленки марки ВПС–2,5 в исследованных пределах частот незначительно влияет на эффективность диссипации энергии в М–П–М структурах, при условии, что толщина полимерного слоя существенно меньше толщины металлического слоя (около 4 мм). Пленка ВПС–2,5 обладает высокой диссипацией колебательной энергии в М–П–М структурах в диапазонах частот от 1 до 6000 Гц, включая низкие частоты (ниже 200 Гц).

Литература

1. Handbook of Noise and Vibration Control. Edited by Malcolm J. Crocker. John Wiley & Sons, Inc.. 2007. P. 1584. ISBN: 0471395994.
2. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж.. Демпфирование колебаний / пер. с англ. Л. Г. Корнейчука/ под ред. Э. И. Григолюка. М.: Мир. 1988. 448 с. ISBN 5-03-001138-2.
3. Amr M. Baz. Active and Passive Vibration Damping. John Wiley & Sons, Inc. 2019. P. 719. ISBN: 9781118481929
4. Nakra B. C.. Vibration control in machines and structures using viscoelastic damping // Journal of Sound and Vibration. 1998. 211. N3. PP. 449–465.
5. Pravin P. Hujare, Anil D. Sahasrabudhe. Effect of Thickness of Damping Material on Vibration Control of Structural Vibration in Constrained Layer Damping Treatment // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 592–594 PP. 2031–2035 PP. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.592–594.2031.
6. Komlan Koussan, Hakim Boudaoud, El Mostafa Daya, Yao Koutsawa, Erasmo Carrera. Sensitivity analysis of the damping properties of viscoelastic composite structures according to the layers thicknesses // Composite Structures. 2016. Vol. 149. PP. 11–25. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.03.061.
7. Sher B.R., Moreira R.A.S. Dimensionless analysis of constrained damping treatments // Composite Structures. 2013. Vol. 99. P. 241–254. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.11.037
8. Ronald F. Gibson, Yu Chen, Hui Zhao. Improvement of Vibration Damping Capacity and Fracture Toughness in Composite Laminates by the Use of Polymeric Interleaves. Journal of Engineering Materials and Technology. 2001. Vol. 123. PP. 309–314. DOI: 10.1115/1.1370385.
9. 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.