

УДК: 542.8
OECD: 1.03.AA

Демпфирование в трехслойных конструкциях металл-полимер-металл с термопластичной пленкой из поливинилацетата

Сятковский А.И.¹, Рюткянен Е.А.², А.В. Кудяев^{3*}

¹ К.х.н., директор по науке ОАО "Пластполимер"

² К.х.н., Кафедра химической технологии полимеров, Санкт-Петербургский
государственный технологический институт

³ К.т.н., доцент кафедры «Экология и производственная безопасность», Балтийский
государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" им. Д.Ф. Устинова
^{1,2,3} г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

Методом динамического механического анализа были получены унифицированные обобщенные кривые описывающие изменения компонентов комплексного модуля упругости для полимерной пленки на основе поливинилацетата ВПС-2,5 в широком интервале температур и частот. Эти данные были использованы для расчета собственных частот первых трех резонансов и коэффициентов механических потерь трехслойных структур металл-пленка-металл с различным соотношением толщин вязкоупругого и армирующего слоев. Расчетные данные сопоставлялись с экспериментальными. Дополнительно исследовались параметры демпфирования в консольно закрепленных трехслойных стержнях с внутренним слоем из ВПС-2,5. Показано, что высокие демпфирующие свойства материала ВПС-2,5 реализуются в трехслойных композитах при толщинах пленок 0,06-0,1 мм.

Ключевые слова: трехслойные композиты, термопластичные пленки, поливинилацетат, вибродемпфирующие материалы.

Damping in three-layer structures metal-polymer-metal with thermoplastic film of polyvinyl acetate

Syatkovsky A.I.¹, Ryutkyanen E.A.², Kudaev A.V.³

¹ *Ph.D. in Chemistry, Director of Science, JSC "Plastpolymer"*

² *Ph.D. in Chemistry, Deputy Head of the Department for Academic Affairs, Department of Chemical
Technology of Polymers, St. Petersburg State Technological Institute*

³ *PhD in Technology, Associate Professor of the Department "Ecology and Industrial Safety", Baltic State
Technical University "VOENMEH" named after D.F. Ustinov*

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

Abstract

The method of dynamic mechanical analysis was used to obtain unified generalized curves describing changes in the components of the complex modulus of elasticity for a polymer film based on polyvinyl acetate VPS 2.5 in a wide range of temperatures and frequencies. These data were used to calculate the natural frequencies of the first three resonances and the mechanical loss coefficients of three-layer metal-film-metal structures with different ratios of the thicknesses of the viscoelastic and reinforcing layers. The calculated data

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

were compared with the experimental ones. Additionally, damping parameters were studied in cantilevered three-layer rods with an inner layer from VPS 2.5. It is shown that the high damping properties of the VPS 2.5 material are realized in three-layer composites with film thicknesses of 0.06–0.1 mm.

Keywords: three-layer composites, thermoplastic films, polyvinyl acetate, vibration damping materials

Введение

Одной из наиболее эффективных технологий вибродемпфирования является использование армированных и слоистых композитных материалов, 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 материалов (ВЭМ) 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 и обеспечивающего их совместную работу мягкого слоя. Вязкоупругий полимер мягкого слоя характеризуется низким модулем сдвига, порождающим высокую сдвиговую податливость трехслойной конструкции, присущую всем работающим на изгиб многослойным структурам. Увеличение толщины вязкоупругого слоя приводит к снижению жесткости конструкции, что нежелательно, а, в ряде случаев, и абсолютно недопустимо. Рациональный выбор мягкого слоя вязкоупругого полимера, его толщина и расположение среди армирующих слоев позволяет увеличить демпфирование слоистой структуры по сравнению с однородной конструкцией близкой массы, жесткости и несущей способности [1-3].

Общей особенностью сэндвичевых конструкций, содержащих внутренние вязкоупругие полимерные слои, является наличие экстремальной зависимости демпфирующих характеристик от температуры и частоты возмущения. Эффективное демпфирование для каждого конкретного вида полимерного связующего при фиксированной частоте достигается в некотором конкретном интервале температур, вне которого эффективность демпфирования снижается. К таким материалам относятся вязкоупругие гомополимеры, проявляющие высокие диссипативные свойства в сравнительно узком температурном и частотном диапазонах [1,2].

В то же время, с расширением температурно-частотного интервала демпфирования, как правило, происходит снижение максимальной величины коэффициента механических потерь [4], что в ряде ответственных технических позиций нежелательно. Для этих позиций первостепенное значение имеют именно высокие коэффициенты потерь в конкретном, сравнительно узком диапазоне температур и частот, что открывает, на наш взгляд, дополнительные перспективы для тонких пленок из термопластичных демпфирующих материалов на основе гомополимеров.

В практическом отношении, при проектировании и создании вибродемпфирующих конструкций, содержащих внутренние слои из ВЭМ, для создания корректных математических моделей необходимо иметь полную информацию о физико-механических показателях полимерного связующего в широком интервале частот и температур. Однако, получение таких данных в достаточно широком интервале частот и температур представляет собой на практике достаточно сложную задачу. Использование принципа

температурно-частотной суперпозиции позволяет по набору базовых экспериментальных данных, полученного в относительно узком диапазоне частот и температур, рассчитать так называемые унифицированные обобщенные кривые для данного ВЭМ. Из этих унифицированных обобщенных кривых, представленных в специальной координатной сетке, могут быть определены значения модуля накопления и коэффициента потерь для данного ВЭМ в значительно более широком интервале температур и частот [2,5].

Ранее сообщалось об успешном опыте использования в составе сэндвичевых конструкций термопластичной пластифицированной пленки ВПС-2,5 на основе поливинилацетата (ПВА), обладающего исключительно высоким коэффициентом механических потерь [6]. Эта пленка успешно используется как вибропоглощающий слой в составе металлоконструкций и при производстве листовых вибродемпфирующих материалов, таких как «Випонит» и «ВТП-2В» [7,8].

Цель работы - методом динамического механического анализа (ДМА) провести исследование зависимостей от температуры и частоты модуля накопления и коэффициента механических потерь полимерной пленки ВПС-2,5 с целью построения для этого материала унифицированных обобщенных кривых компонентов комплексного модуля упругости в широком интервале температур и частот. На базе полученных универсальных обобщенных зависимостей провести расчет трехслойной структуры металл-полимер-металл с различным соотношением вязкоупругого и армирующих слоев. Путем сопоставления расчетных данных с экспериментальными оценить возможность использования пленки ВПС-2,5 в виде тонких слоев в составе слоистых композитных материалов.

1. Экспериментальная часть

Исходная пленка ВПС-2,5 соответствовала ТУ 4515-001-00203521-93.

Экспериментальные величины модуля накопления и коэффициента механических потерь определены на динамическом механическом анализаторе ДМА Q-800 в режиме растяжения, в диапазоне температур $[-17 \div +34]^{\circ}\text{C}$ при фиксированных значениях частоты колебаний $f = 1, 2, 5, 10, 20, 40$ Гц. Экспериментальные значения собственных частот f_i^{exp} и соответствующих им коэффициентов механических потерь η_i^{exp} для i -ой моды ($i = 1 - 3$) колебаний без опорных трехслойных пластин определялись резонансным методом при $T = 28^{\circ}\text{C}$.

Разновидность классического метода Оберста для трехслойных консольно-закрепленных стержней со свободным концом [1,9] использована для измерения механических свойств пленки ВПС 2,5 в тонких слоях. Определялись собственные частоты f_1^{exp} для первых мод колебаний и соответствующие им значения коэффициентов механических потерь η_1^{exp} . Для повышения точности каждое измерение проводилось на 6 параллельных образцах.

Пластины и стержни изготавливались из стали ($E = 2,05$ ГПа, $\gamma = 0,29$, $\rho = 7700$ кг/м³), где E - модуль Юнга, γ - коэффициент Пуассона, а ρ - плотность. Геометрические параметры пластин и стержней указаны в тексте.

2. Результаты

Для количественной характеристики упругих и диссипативных свойств полимеров используются аналитические зависимости составляющих комплексного модуля пружности: вещественной части комплексного модуля упругости (модуль накопления) $ReE(f,T) = E'(f,T)$ и мнимой части комплексного модуля упругости (модуль потерь) $ImE(f,T) = E''(f,T)$. Здесь f – частота колебаний, T – температура. Отношение модуля потерь к модулю накопления определяет величину коэффициента механических потерь $\eta(f,T) = E''(f,T)/E'(f,T)$ [2]. Аналитические представления зависимостей $E'(f,T)$, $E''(f,T)$, $\eta(f,T)$ находятся путем аппроксимации экспериментальных данных, полученных в процессе проведения динамического механического анализа.

На рис. 1 приведены экспериментальные величины модуля накопления E' и коэффициента механических потерь η пленки марки ВПС-2,5, определенные методом ДМА в режиме растяжения. Из анализа приведенных на рис. 1 результатов следует, что для всех фиксированных значений f при температуре $T \leq -14^\circ\text{C}$ изменения величин модуля накопления и коэффициента механических потерь малы (материал деформируется почти упруго). Поэтому в дальнейшем рассматривается диапазон изменения температуры: $[-14 \div +34]^\circ\text{C}$

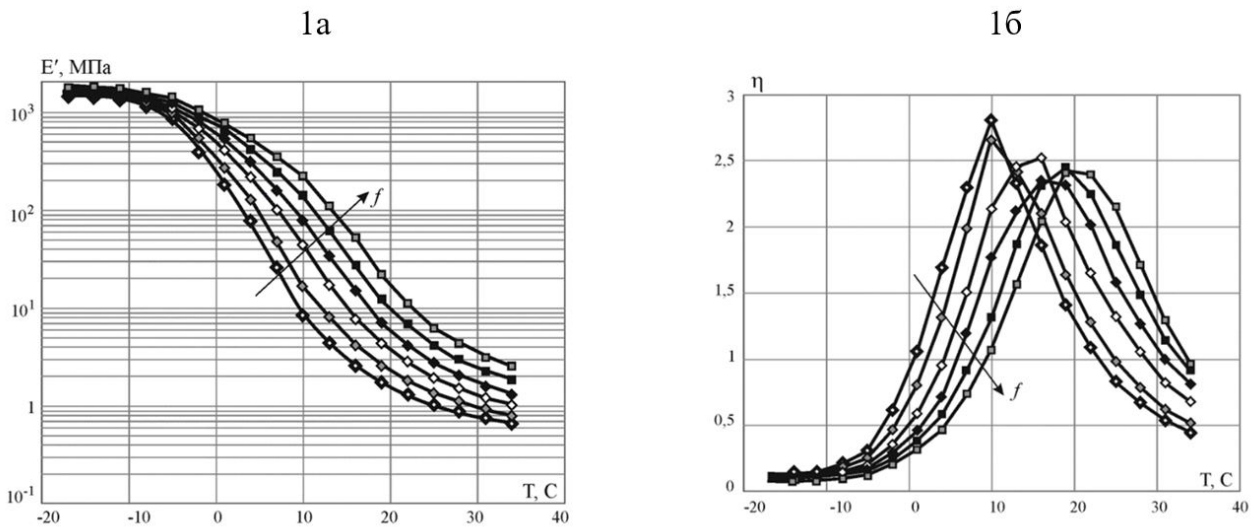


Рис. 1. Зависимости модуля накопления E' (1а) и коэффициента механических потерь η (1б) от температуры для пленки ВПС-2,5. Спектры сняты при различных частотах $f = 1; 2; 5; 10; 20; 40$ Гц. Стрелкой на рисунке указан порядок расположения спектров в зависимости от используемой частоты

На рис. 2 представлен график зависимости коэффициента механических потерь η от абсолютного значения комплексного модуля упругости $E_M = [(E^1)^2 + (E^{11})^2]^{1/2}$, являющийся своего рода оценкой качества полученных экспериментальных данных [10].

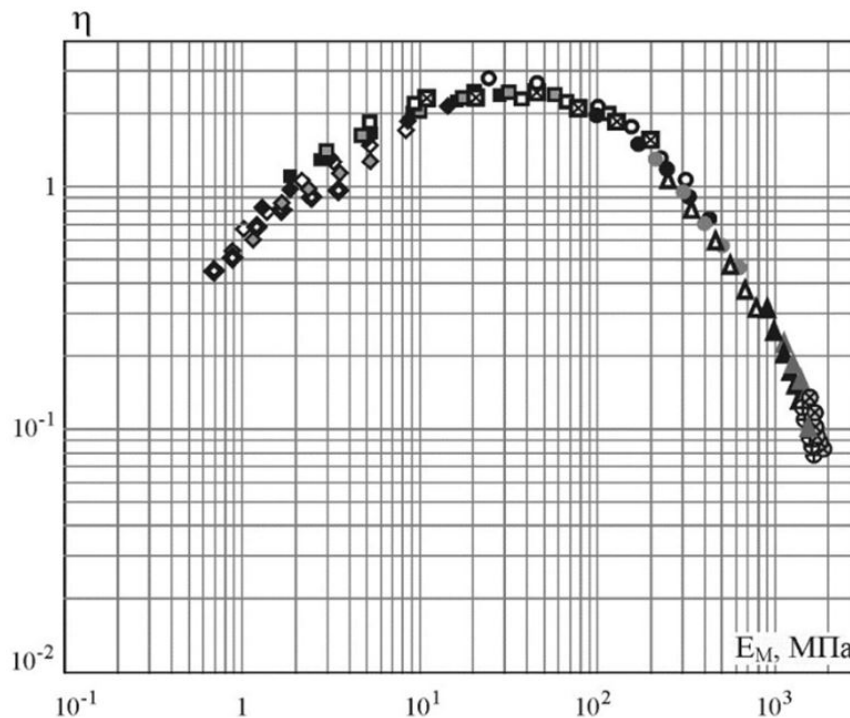


Рис. 2. Зависимость коэффициента механических потерь η от абсолютного значения комплексного модуля E_M при различных температурах и частотах (обозначения аналогичны использованным на рис.1)

Все экспериментальные точки лежат на плавной кривой, значительного разброса не наблюдается. Следовательно, пленка ВПС-2,5 может быть отнесена к терморологически простому материалу [11]. В этом случае применим метод температурно-частотного приведения, который позволяет установить безразмерную функцию температурного смещения [1,5,11].

Аппроксимация функции температурного смещения выполнена двумя способами: с использованием аналитической функции и эмпирического уравнения Вильямса, Ландела и Ферри (ВЛФ):

$$\lg \alpha_T = \frac{c_1(T - T_R)}{c_2 + (T - T_R)}$$

где в качестве температуры приведения используется значение $T_R = 16^\circ\text{C}$.

В качестве аналитической функции рассматривался полином $\lg \alpha_T = \sum_{i=1}^n \alpha_i(T)^{n-i}$, порядок которого устанавливался исходя из условия обеспечения наименьшего отклонения от аппроксимируемых данных.

Наилучшее приближение к экспериментальным данным обеспечивают следующие эмпирические параметры: $c_1 = 14,14$, $c_2 = 100,8$; $\alpha_1 = -1,26 \cdot 10^{-6}$, $\alpha_2 = 4,01 \cdot 10^{-5}$, $\alpha_3 = 2,13 \cdot 10^{-3}$, $\alpha_4 = -2,14 \cdot 10^{-1}$, $\alpha_5 = 2,74$.

При построении унифицированных обобщенных зависимостей модуль накопления и коэффициент механических потерь рассматриваются как функции приведенной частоты $f_{Ri} = f_i \alpha_T(T_i)$. Здесь f_i , T_i – частота и температура i -ой экспериментальной точки; $\alpha_T(T_i)$ – значение функции температурного смещения, соответствующее температуре T_i .

На рис. 3 показан график зависимости компонентов комплексного модуля упругости от приведенной частоты f_R .

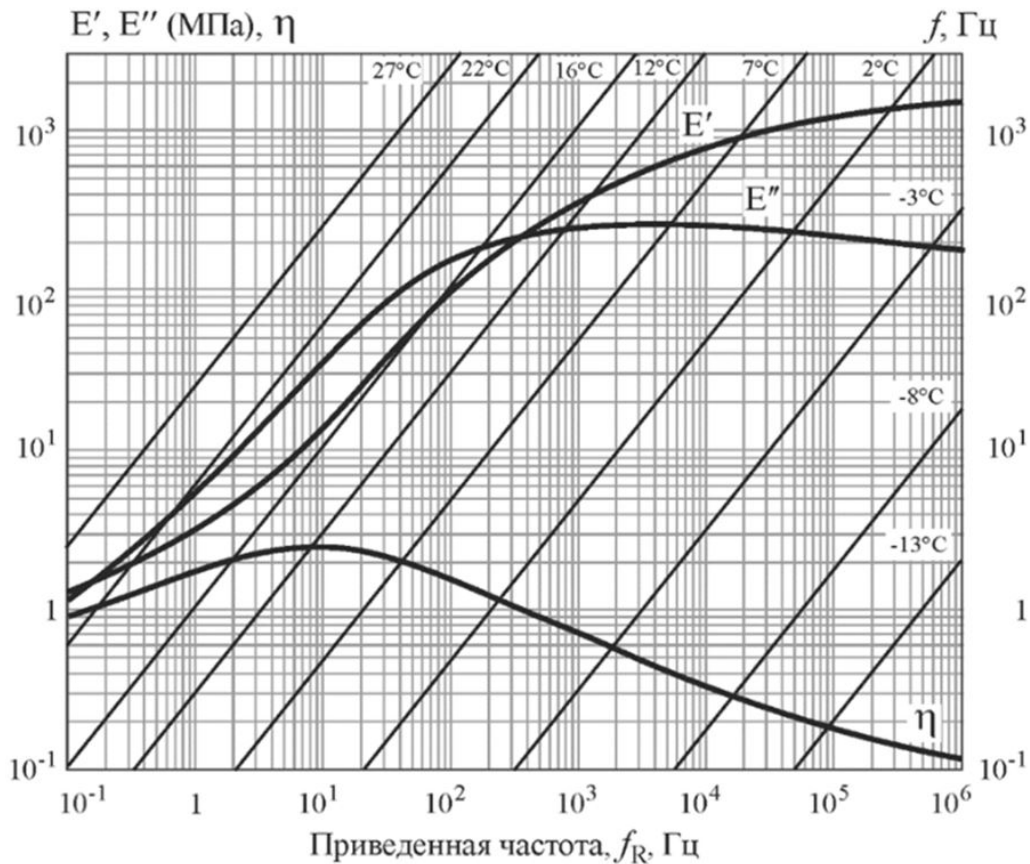


Рис. 3. Номограмма «температура- частота- приведенная частота» для компонентов комплексного модуля упругости пленочного материала ВПС-2,5

Расположенные на графике прямые линии постоянной температуры (температурные линии Джоунса), вместе с горизонтальной осью приведенной частоты и вертикальной осью частоты представляют номограмму «температура-частота-приведенная частота» [1,5,10] для пленки ВПС-2,5. Заметим, что в качестве аппроксимирующих функций могут быть использованы полиномиальные зависимости:

$$\lg E'(f_R) = \sum_{m=0}^N p_m (\lg f_R)^{(N-m)}, \quad \lg \eta(f_R) = \sum_{m=0}^N q_m (\lg f_R)^{(N-m)},$$

коэффициенты в которых определяются так, чтобы обеспечить наименьшее отклонение с экспериментом в исследуемом диапазоне частот (в нашем случае в диапазоне $[0.1 - 10^6]$ Гц).

Естественно, что в реальных расчетах удобнее пользоваться полиномиальным представлением компонентов комплексного модуля, чем соответствующими номограммами.

3. Демпфирование в структурах металл –ВПС-2,5 -металл

Рассматриваемые вязкоупругие полимеры используются при создании слоистых структур с высоким уровнем диссипативных характеристик. Простейшая структура представляет собой трехслойную пластину, образованную двумя жесткими слоями из металла и мягким средним слоем из вязкоупругого полимера. Поперечные затухающие колебания трехслойной пластины с жесткими внешними изотропными слоями равной толщины и средним слоем из вязкоупругого полимера описываются

системой дифференциальных уравнений и естественными граничными условиями, полученными как частный случай более общей задачи, рассмотренной в [12,13]. Для решения комплексных задач на собственные значения применялся метод итераций третьего порядка, описанный в [14].

Математическая модель затухающих колебаний трехслойной пластины, достоверность которой подтверждена в [12], использовалась для иллюстрации достоверности аналитического описания свойств вязкоупругого полимера среднего слоя. Для этого были изготовлены четыре опытных трехслойные пластины, геометрические размеры которых приведены в табл. 1, и проведено сопоставление расчетных и экспериментальных значений их собственных частот и коэффициентов механических потерь. Мягкий слой трехслойных пластин выполнялся из вязкоупругого полимера ВПС-2,5. В расчетах для вязкоупругого слоя использовались значения $\gamma = 0,5$, $\rho = 1290 \text{ кг/м}^3$, где γ - коэффициент Пуассона, а ρ - плотность. Значения модуля накопления E_1 и η при 28°C брались из полученных выше унифицированных кривых для компонентов комплексного модуля (Рис. 4).

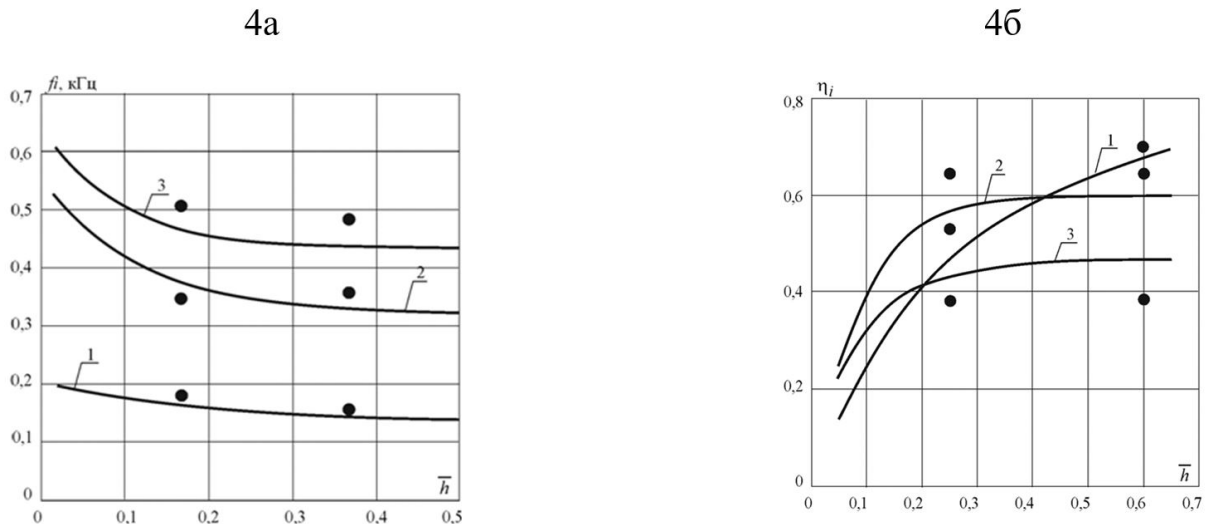


Рис. 4. Сопоставление расчетных (сплошные линии) и экспериментальных данных (точки) от относительной толщины вязкоупругого слоя \bar{h} собственных частот колебаний f (4а) и коэффициентов механических потерь η (4б) для первых трех мод колебаний $i = 1,2,3$. Образцы 1 и 2 (таблица 1)

Таблица 1

Геометрические размеры опытных трехслойных пластин: длина пластин 400 мм, ширина пластин 50 мм. $h_1 = h_3 = h$ - толщина внешних металлических слоев, h_2 - толщина внутреннего слоя из пленки ВПС-2,5

№ пластины	$Bh_1 = h_3 = h$, мм	h_2 , мм
1	3	0,35
2	3	1,2
3	2	0,5
4	2	1,2

Графики расчетных зависимостей собственных частот колебаний трехслойных пластин $f_i^{cal} = f_i^{cal}(\bar{h})$ и соответствующих этим частотам коэффициентов механических

потерь $\eta_i^{cal} = \eta_i^{cal}(\bar{h})$ от относительной толщины слоя вязкоупругого полимера $\bar{h} = h_2/h$ сплошными линиями приведены на рис. 4 и рис.5. На этих же рисунках точками изображены экспериментальные значения собственных частот f_i^{exp} и коэффициентов механических потерь η_i^{exp} ($i = 1 - 3$), где i - соответствующий номер колебательной моды. Совместный анализ результатов, приведенных на рис. 4, 5 свидетельствует об адекватности аналитического описания упругих и диссипативных свойств, входящего в состав слоистой конструкции вязкоупругого полимера в широком температурно-частотном диапазоне. Для рассмотренных трехслойных пластин справедливы неравенства, $\Delta f_i \leq |10\%|$, $\Delta \eta_i \leq |19\%|$, где $-\Delta f_i = [(f_i^{cal}/f_i^{exp}) - 1] \times 100\%$, а $\Delta \eta_i = [(\eta_i^{cal}/\eta_i^{exp}) - 1] \times 100\%$ величины, характеризующие расхождения между значениями экспериментальных и расчетных данных.

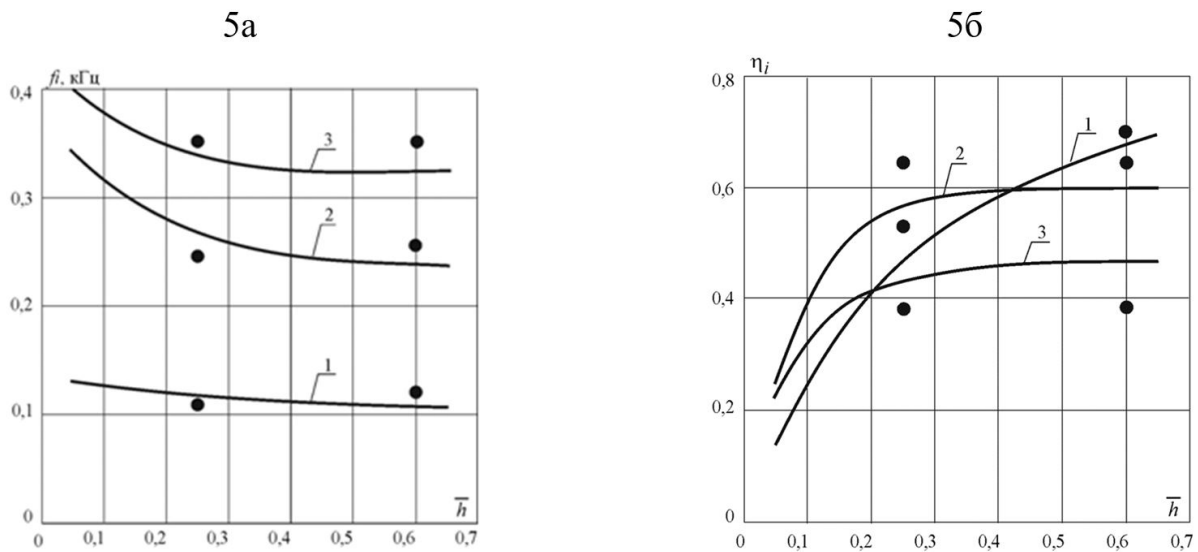


Рис. 5. Сопоставление расчетных (сплошные линии) и экспериментальных данных (точки) от относительной толщины вязкоупругого слоя \bar{h} собственных частот колебаний f (5а) и коэффициентов механических потерь η (5б) для первых трех мод колебаний $i = 1,2,3$. Образцы 3 и 4 (таблица 1).

Расчетные и экспериментальные данные, представленные на рис.4 и рис.5, относятся к случаю без опорных трехслойных пластин со свободными концами. Для проверки возможности материала ВПС-2,5 осуществлять эффективное демпфирование в виде очень тонких пленок были исследованы зависимости коэффициента механических потерь в трехслойных металл-полимер-металл, консольно-закрепленных стержнях со свободными концами от толщины внутренних и внешних слоев конструкции (Таблица 2).

Таблица 2

Геометрические параметры трехслойных стержней, собственная частота 1 моды f_1 , коэффициент потерь на частоте f_1 для колебаний консольно закрепленных стержней по методу Оберста; $h_1 = h_3 = h$ – толщина внешних армирующих слоев, h_2 – толщина внутреннего слоя из пленки ВПС-2,5, длина стержней 230 мм, ширина 8 мм

№ образца	$h_1 = h_3 = h$, мм	h_2 , мм	h_2/h	f_1	η_1
5	3	0,06	0,02	284	0,345
6	3	0,22	0,07	320	0,42
7	3	0,5	0,17	345	0,81
8	2	0,06	0,03	207	0,255
9	2	0,29	0,15	253	0,29
10	2	0,52	0,26	250	0,53
11	1,5	0,1	0,07	178	0,35
12	1,5	0,25	0,17	180	0,35
13	1,5	0,45	0,30	165	0,96

Известно, что зависимость абсолютных значений коэффициентов механических потерь от соотношения толщин вязкоупругого и армирующих слоев определяется как граничными условиями в трехслойных структурах, так и модой собственных колебаний [15, 16].

Представленные на рис.4б, 5б и в таблице 2 экспериментальные данные свидетельствуют о том, что, хотя с увеличением толщины вязкоупругого слоя коэффициент механических потерь увеличивается, пленки ВПС-2,5 обладают достаточно высокими диссипативными свойствами и при толщинах 0,06 - 0,10 мм, соответствующих соотношению толщин вязкоупругого и армирующего слоев $\bar{h} \approx 0,02$.

Заключение

Полученные в работе результаты позволяют сформулировать следующие выводы:

- показано, что пленки из вибропоглощающего материала ВПС-2,5 обладают высокими диссипативными свойствами в слоях толщиной 0,06 - 0,1 мм, что делает их перспективным компонентом для многослойных композиционных материалов;
- для ВПС-2,5 получены универсальные обобщенные зависимости компонентов комплексного модуля в широком диапазоне частот и температур, что позволяет использовать эти данные при математическом моделировании и проектировании демпфирующих конструкций;
- корректность полученных обобщенных унифицированных кривых проверена путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных по частотам собственных колебаний и коэффициентов потерь для трехслойной пластины вида: металл- пленка ВПС-2,5- металл.

Список литературы

1. Amr M.Baz.Active and passive vibration damping // John Wiley & Sons. 2018. P. 752. ISBN: 978-1-118-53760-2
2. Chakraborty B.C., Debdatta Ratna. Polymer for vibration damping applications // Elsevier. 2020. P. 348. eBook ISBN: 9780128192535.

3. Nikbakt S., Kamarian S., Shakeri M. A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites // *Compos. Structures*. 2018. V. 195. P. 158–185. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.063>
4. Hartman B. // *Sound and Vibration Damping with Polymers: ACS Symp.Ser.Am. Chem.Soc.Washington, DC, 1990. P.23-45.*
5. Rouleau L., Pluymers B., Destem W. Characterization and modeling of the viscoelastic behavior of a self-adhesive rubber using dynamic mechanical analysis test // *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2015. Vol. 7. No 2. Apr.-Jun. P. 200-208.
6. Скуратова Т.Б., Кириллов С.Е., Сятковский А.И. Диссипативные свойства полимерных пленок и композитных материалов на основе поливинилацетата // *ЖПХ*. 2019. Т. 92. № 7. С. 881–887. <https://doi.org/10.1134/S0044461819070090>
7. Кирпичников В.Ю., Сятковский А.И., Шлемов Ю.Ф. Высокоэффективные средства низкочастотного демпфирования с упругим элементом из полимерной пленки // *Судостроение*. 2020. № 1. С. 44-47.
8. Платонов М.М., Шульдешов Е.М., Нестерова Т.А., Сагомонова В.А. Акустические полимерные материалы нового поколения // *Труды ВИАМ*. 2016. Т. 40. № 4. С. 76–84. [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9)
9. Pravin P.Hujare, Anil D.Sahasrabudhe Experimental investigation of damping performance of viscoelastic material using constrained layer damping treatment. *Procedia Materials Science*, 2014, Vol.5, P.726-733. [doi:10.1016/j.mspro.2014.07.32](https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.32)
10. ГОСТ ИСО 10112-2002 Материалы демпфирующие. Графическое представление комплексных модулей упругости.
11. Ferry J.D. *Viscoelastic Properties of Polymers*. 3rd ed. New York, NY: Wiley, 1980. 641 p.
12. Рябов В. М., Ярцев Б. А., Паршина Л. В. Связанные колебания вязкоупругих трехслойных композитных пластин. 1. Постановка задачи // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2020. Т. 7 (65). Вып. 3. С. 469-480.
13. Рябов В. М., Ярцев Б. А., Паршина Л. В. Связанные колебания вязкоупругих трехслойных композитных пластин. 2. Численный эксперимент // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2021. Т. 8 (66). Вып. 1. С. 88-100.
14. Паршина Л.В., Рябов В.М., Ярцев Б.А. Рассеяние энергии при колебаниях неоднородных композитных структур. 2. Метод решения // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия*. 2018. Т. 5 (63). Вып. 4. С. 678-688.
15. Sher B.R., Moreira R.A.S. Dimensionless analysis of constrained damping treatments // *Composite Structure* 2013. Vol.99, P.241-254. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.037>
16. Akoussan K., Boudaoud H., El Daya M., Koutsawa Y., Carrera E. // Sensitivity analysis of the damping properties of viscoelastic composite structure according to the layers thicknesses. *Composite Structures*. 2016. Vol.49, P.11-25

References

1. Amr M.Baz. *Active and passive vibration damping* // John Wiley & Sons. 2018. P. 752. ISBN: 978-1-118-53760-2
2. Chakraborty B.C., Debdatta Ratna. *Polymer for vibration damping applications* // Elsevier. 2020. P. 348. eBook ISBN: 9780128192535.

3. Nikbakt S., Kamarian S., Shakeri M. A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites // *Compos. Structures*. 2018. V. 195. P. 158–185. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.03.063>
4. Hartman B. // *Sound and Vibration Damping with Polymers: ACS Symp. Ser. Am. Chem. Soc. Washington, DC*, 1990. P.23-45.
5. Rouleau L., Pluymers B., Destem W. Characterization and modeling of the viscoelastic behavior of a self-adhesive rubber using dynamic mechanical analysis test // *Journal of Aerospace Technology and Management*. 2015. Vol. 7. No 2. Apr.-Jun. P. 200-208.
6. Skuratova T.B., Kirillov S.E., Syatkovsky A.I. Dissipative properties of polymer films and composite materials based on polyvinyl acetate // *ZhPKh*. 2019. V. 92. No 7. S. 881-887. <https://doi.org/10.1134/S0044461819070090>
7. Kirpichnikov V.Yu., Syatkovsky A.I., Shlemov Yu.F. Highly effective means of low-frequency damping with an elastic element made of a polymer film // *Shipbuilding*. 2020. No. 1. S. 44-47.
8. Platonov M.M., Shuldeshov E.M., Nesterova T.A., Sagomonova V.A. Acoustic polymeric materials of a new generation // *Proceedings of VIAM*. 2016. V. 40. No. 4. S. 76-84. [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9)
9. Pravin P.Hujare, Anil D.Sahasrabudhe Experimental investigation of damping performance of viscoelastic material using constrained layer damping treatment. *Procedia Materials Science*, 2014, Vol.5, P.726-733. [doi:10.1016/j.mspro.2014.07.32](https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.32)
10. GOST standard ISO 10112-2002 Damping materials. Graphical representation of complex moduli of elasticity. Ferry J.D. *Viscoelastic Properties of Polymers*. 3rd ed. New York, NY: Wiley, 1980. 641 p.
11. Ferry J.D. *Viscoelastic Properties of Polymers*. 3rd ed. New York, NY: Wiley, 1980. 641 p.
12. V. M. Ryabov, B. A. Yartsev, and L. V. Parshina, Coupled vibrations of viscoelastic three-layer composite plates. 1. Statement of the problem // *Bulletin of St. Petersburg University. Maths. Mechanics. Astronomy*. 2020. Vol. 7 (65). Issue. 3. S. 469-480.
13. V. M. Ryabov, B. A. Yartsev, and L. V. Parshina, Coupled vibrations of viscoelastic three-layer composite plates. 2. Numerical experiment // *Bulletin of St. Petersburg University. Maths. Mechanics. Astronomy*. 2021. Vol. 8 (66). Issue. 1. S. 88-100.
14. Parshina L.V., Ryabov V.M., Yartsev B.A. Energy dissipation during vibrations of inhomogeneous composite structures. 2. Method of solution // *Bulletin of St. Petersburg University. Maths. Mechanics. Astronomy*. 2018. V. 5 (63). Issue. 4. S. 678-688.
15. Sher B.R., Moreira R.A.S. Dimensionless analysis of constrained damping treatments // *Composite Structure* 2013. Vol.99, P.241-254. [http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.037](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.11.037)
16. Akoussan K., Boudaoud H., El Daya M., Koutsawa Y., Carrera E. // Sensitivity analysis of the damping properties of viscoelastic composite structure according to the layers thicknesses. *Composite Structures*. 2016. Vol.49, P.11-25.