

Термопластичные пленочные материалы для демпфирования инженерных конструкций

Thermoplastic film materials for damping in mechanical engineering

А.И. СЯТКОВСКИЙ

A.I. SYATKOVSKIY

ОАО «Пластполимер», Санкт-Петербург, Россия

Plastpolymer JSK, St Petersburg, Russia

nauka@plastpolymer.com

Эффективным способом демпфирования инженерных конструкций является использование в них элементов, образованных совокупностью жестких и мягких чередующихся слоев. Внешние жесткие слои, изготовленные из конструкционных материалов, воспринимают силовые воздействия, в то время как мягкие слои из вязкоупругих полимеров обеспечивают диссипацию энергии слоистой структуры. В работе обобщаются результаты исследований по созданию типорядов тонких термопластичных пленок из пластифицированных поливинилацетата, полибутилметакрилата и полиметилметакрилата, обладающих сверхвысокими диссипативными свойствами и используемых в качестве вибропоглощающего компонента составных конструкций. Показано, что высокие демпфирующие свойства реализуются в пленках толщиной 0,1–0,05 мм, что дает возможность получения двух- и трехслойных вибропоглощающих пленок с расширенным температурным интервалом эффективного демпфирования в структурах вида металл-полимер-металл.

Ключевые слова: термопластичные пленки, поливинилацетат, полибутилметакрилат, полиметилметакрилат, вибродемпфирующие материалы

An effective way of damping engineering structures is to use elements formed by a combination of hard and soft alternating layers. The outer rigid layers, made of structural materials, take up force influences, while the soft layers of viscoelastic polymers provide energy dissipation of the layered structure. The paper summarizes the results of research on the development of thin thermoplastic films of plasticized polyvinyl acetate, polybutylmethacrylate and polymethylmethacrylate which have ultra-high dissipative properties and are used as a vibration-absorbing component of composite structures. It is shown that high damping properties are realized in films with thickness of 0.1–0.05 mm, which makes it possible to obtain two- and three-layer vibration-absorbing films with an extended temperature interval of effective damping in the metal-polymer-metal structures.

Keywords: thermoplastic films, polyvinyl acetate, polybutylmethacrylate, polymethylmethacrylate, vibration-damping materials

DOI: 10.35164/0554-2901-2023-9-10-48-52

Возникновение в конструкциях вибрационных полей связано с возбуждением в них колебаний под действием изменяющихся во времени силовых воздействий. Основной задачей вибродемпфирования является контроль над процессами, связанными с вибрацией. В общем случае демпфирование (вибропоглощение) определяется как необратимый отвод энергии от колеблющейся системы и перевод ее в тепловую.

Эффективным способом повышения демпфирования является применение неоднородных элементов конструкций, образованных совокупностью жестких и мягких слоев. Внешние жесткие слои, изготавливаемые из конструкционных материалов, воспринимают силовые воздействия, в то время как мягкие слои из вязкоупругих полимеров обеспечивают диссипацию энергии слоистой структуры [1–3]. 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. Эта особенность работы, присущая всем работающим на изгиб многослойным структурам, с точки зрения прочности и жесткости нежелательна [3, 4]. Однако при вибрационных нагрузках такой недостаток превращается в достоинство, т.к. вязкоупругий полимер в процессе сдвигового квазигармонического деформирования рассеивает значительную часть подводимой механической энергии, уменьшая тем самым амплитуду колебаний. По существу, тот же самый механизм реализуется и в вибропоглощающих покрытиях с армирующим слоем (CLD), где слой полимерного связующего помещен между демпфируемой поверхностью и армирующей пластиной с высокой механиче-

ской жесткостью [2, 3]. Рациональный выбор толщины полимера мягкого слоя и места его расположения внутри конструкции позволяет существенно увеличить демпфирование слоистой структуры по сравнению с однородной конструкцией близкой массы, жесткости и несущей способности. Поэтому одно из наиболее актуальных направлений работ в этой области связано с расширением круга вязкоупругих полимерных связующих. Они должны обладать высокими механическими потерями в определенном (желательно – максимально широком) температурном и частотном диапазонах, соответствовать ограничениям по жесткости на сдвиг и быть адаптированными к конкретному применению. Использование в качестве полимерного связующего тонких вязкоупругих пленок или листов, которые монтируются в многослойную (сэндвичевую) конструкцию, является одним из наиболее рациональных путей изготовления слоистых вибродемпфирующих композиций и вибродемпфирующих покрытий с армирующим слоем [5, 6].

Многочисленные исследования сэндвичевых структур, содержащих внутренние слои из вязкоупругих полимерных материалов, показали, что коэффициент механических потерь в конструкции прямо пропорционален коэффициенту механических потерь внутреннего полимерного слоя [3, 7]. Таким образом, полимер – потенциальный кандидат в качестве диссипативного слоя в многослойных вибродемпфирующих материалах – должен иметь высокий коэффициент механических потерь. Гомополимеры, статистические сополимеры, смеси термодинамически совместимых полимеров обычно имеют высокие коэффициенты механических потерь, но относительно узкий спектр времен релаксации, и поэтому интенсивно поглощают колебательную энергию в сравнительно узком диапазоне температур и частот. Как следствие,

в слоистых структурах высокоэффективное демпфирование достигается в относительно узком диапазоне частот и температур. Этот эффект, обусловленный физико-химическими свойствами высокомолекулярных гомо- и сополимеров, является принципиальным недостатком рассматриваемого способа демпфирования, и поиск путей его преодоления зачастую является одной из основных проблем [7]. Так, было показано, что направленное создание в материале локальной микрогетерофазности приводит к расширению спектра времен релаксации, и как следствие – к расширению интервала температур и частот эффективного демпфирования. Традиционные подходы к получению гетерогенной морфологии включают смешивание полимеров с умеренной несовместимостью, создание взаимопроникающих полимерных сеток, введение градиентов поперечных связей в структуру и т.п. [7]. Такими методами можно расширить температурно-частотный интервал демпфирования полимерного материала, но при этом происходит существенное снижение пиковой интенсивности диссипации энергии и уменьшение абсолютных максимальных значений коэффициента потерь [8], что в ряде практических задач совершенно неприемлемо.

Основным способом решения этой проблемы является создание типорядов сходных по строению демпфирующих материалов, подбираемых под требуемые условия и, в то же время, перекрывающих широкий диапазон температур эксплуатации. Используемыми в технике типичными примерами таких типорядов могут являться адгезивы ISD-110, ISD112, ISD-113, ISD-830 производства фирмы 3M; связующие DYAD 601, DYAD 606, DYAD 609 производства фирмы Soundcoat Inc.; связующие EAR C-1002, EAR C-2003 производства фирмы EAR; демпфирующие адгезивы RA970, RA925, RA980, RA990 производства фирмы Roush NVH Products [7]. В этом случае проблему расширения температурного интервала демпфирования конструкции можно решать не путем создания нового полимерного материала, а оптимизацией расположения в «сэндвиче» нескольких различных демпфирующих полимерных пленок, например, путем их «объединения» в единый многослойный материал или путем их рационального размещения на демпфируемой поверхности с конкретной геометрической конфигурацией [9, 10].

Несмотря на преимущества вибродемпфирующих материалов, способных работать в сэндвичевых конструкциях, над мастичными, их производство в России ограничивается гаммой каучук-наполненных мембран и смесевых каучук-битумных материалов, нанесенных для повышения эффективности в ряде случаев на армирующий слой из алюминиевой фольги.

Толщина используемых покрытий составляет 2–6 мм, и по своим техническим характеристикам они существенно уступают лучшим зарубежным аналогам. Такая ситуация обусловлена, главным образом, ограниченным ассортиментом промышленно производимых пленочных полимерных материалов, которые могли бы послужить полуфабрикатом для изготовления компонентов слоистых вибропоглощающих конструктивных материалов и покрытий.

Ранее сообщалось об успешном опыте использования в составе сэндвичевых конструкций типорядов термопластичных пластифицированных пленок на основе поливинилацетата (ПВА). Эти материалы в совокупности обладают чрезвычайно высокими коэффициентами механических потерь η в интервале температур $-10^\circ\text{C} - +50^\circ\text{C}$, но имеют ряд принципиальных недостатков [11, 12]. По этой причине нами была предпринята попытка дополнить типоряд пленок из ПВА ассортиментом полимерных пленок на основе промышленно выпускаемых полиакрилатов различного строения.

Целью представленной работы является обобщение результатов исследований по созданию ассортимента отечественных пленочных термопластичных вибродемпфирующих материалов на основе поливинилацетата (ПВА), полибутилметакрилата (ПБМА) и полиметилметакрилата (ПММА), для различного рода многослойных конструкций и вибропоглощающих покрытий. Разработанные материалы обладают очень высокими коэффициентами потерь колебательной энергии, способны эффективно работать в тонких слоях, в рабочем интервале температур $-10 - +100^\circ\text{C}$ и в широком диапазоне частот 1–10000 Гц.

Экспериментальная часть

В качестве исходных полимеров использовали ПБМА, ПВА и ПММА со следующими молекулярно-массовыми характеристиками:

ПБМА: $M_W = 222800$, $M_n = 95500$, $M_W/M_n = 2,33$

ПВА: $M_W = 601000$, $M_n = 99700$, $M_W/M_n = 6,03$

ПММА: $M_W = 94150$, $M_n = 49000$, $M_W/M_n = 1,92$

Пластифицированные пленочные материалы получали путем смешения ПБМА, ПММА или ПВА с пластификаторами и другими добавками в смесителе с последующим экструдированием через лабораторную шнековую машину в пленки. Отдельные образцы готовились прессованием на ручном прессе. Содержание пластификаторов варьировали в интервале от 0 до 40 об.%; использовали совместимые с соответствующими полимерами пластификаторы: трихлорэтилфосфат (ГОСТ 31385-2016), трибутилфосфат (ТУ 2435-305-05763458-01), дибутилфталат, диоктилфталат (ГОСТ 8728-88), хлорпарафин ХП-52 (ТУ2493-277-00203312-2007). Пластификаторы использовались без дополнительной очистки. Многослойные вибродемпфирующие пленки изготавливали из промышленно выпускаемых термопластичных пластифицированных пленок ВПНС-4, ВПС-2,5 и ВПНС-1 (ТУ 4515-001-00203521-93).

Измерения механических показателей образцов осуществляли на приборе ДМА 8000 фирмы Perkin Elmer в режимах «динамическое растяжение» и «трехточечный изгиб» в интервале температур от -50°C до $+150^\circ\text{C}$, в режиме нагревания со скоростью 1°C в минуту. Образцы трехслойных композитных материалов вида металл-полимер-металл (М-Р-М), содержащие внутренний полимерный слой из различных пленок и внешние металлические слои одинаковой толщины, готовили по методу, описанному в [12]. Подготовка образцов для ДМА испытаний также описана в работе [12]. Экспериментальные данные по динамическим механическим свойствам получали в виде зависимостей параметров модуля накопления E' и коэффициента механических потерь η от температуры при фиксированной частоте 1 Гц. По данным ДМА испытаний определяли: $\eta^{\max}$ – максимальное значение параметра η , достигаемое при температуре $T_{\eta^{\max}}$. Дополнительной характеристикой демпфирующих свойств полимерного материала, определяемой из ДМА спектров, является интервал температур эффективного демпфирования $\Delta T_{0,3}$ – интервал температур, в котором для данного материала выполняется условие $\eta \geq 0,3$.

Разновидность классического метода Оберста для трехслойных металл-полимер-металл консольно-закрепленных стержней со свободным концом использована для измерения механических свойств пленок из ПВА и ПБМА в тонких слоях [13]. Метод основан на определении коэффициента потерь в фиксированной точке консольно-закрепленного трехслойного стержня, на который воздействует периодическое возмущение с варьируемой частотой при постоянной температуре. Измерения производятся по уширению отклика сигнала на частоте первого резонанса. Образцы изготавливаются в виде трехслойных стержней (рис. 1).

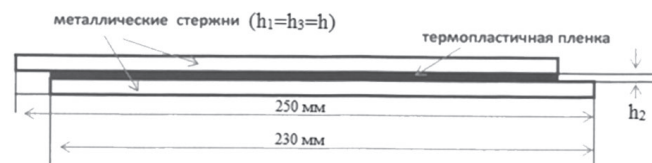


Рис. 1. Образец для измерения коэффициента механических потерь, где $h_1 = h_3 = h$ – толщина металлических стержней (внешних армирующих слоев), h_2 – толщина внутреннего высокоупругого слоя пленки, длина стержней – 230 мм, ширина – 10 мм.

Определяли резонансные частоты f_1 для первых мод колебаний и соответствующие им значения коэффициентов механических потерь η_1 . Для повышения точности каждое измерение проводилось на пяти параллельных образцах.

Результаты

Полимерный материал, способный эффективно демпфировать в составе слоистых конструкций, должен отвечать целому ряду требований, важнейшим из которых является высокий коэффициент механических потерь – $\eta(T)$. Среди термопластичных

полимерных материалов со сверхвысокими диссипативными свойствами (иными словами, обладающими $\eta^{\max} \geq 1,5$), поливинилацетат (ПВА) является своеобразным рекордсменом по этому показателю [11]. Чрезвычайно высокими диссипативными свойствами обладают и два других объекта нашего исследования – полибутилметакрилат (ПБМА) и полиметилметакрилат (ПММА) [7, 12]. Эти полимеры, хотя и несколько уступают ПВА по абсолютным значениям (η), но имеют перед ним преимущества в других показателях. Одним из недостатков ПВА является его низкая температуростойкость (рабочие температуры ≤ 120 – 130°C). Это свойство существенно препятствует возможности его применения в качестве вязкоэластичного слоя в составе многослойных композитных материалов, получаемых путем термического формования. В этом плане альтернативой пленок из ПВА могут служить полимерные композиции на основе полибутилметакрилата (ПБМА) или полиметилметакрилата (ПММА), обладающих существенно более высокой температуростойкостью. Другим недостатком ПВА является его низкая водостойкость, что препятствует использованию композитов с такими пленками в позициях, предполагающих контакт с водными средами. В работе [15] было показано, что пластифицированные пленки из ПБМА имеют существенные преимущества перед пленками из ПВА по водостойкости. Особенностью ПММА является его высокая температура стеклования, что предполагает возможность разработать на его основе полимерные вибродемпфирующие композиции, способные работать при температурах 50– 100°C .

Классическим методом изменения температуры стеклования полимерного материала является введение в него пластификаторов. На рис. 2 представлены экспериментальные данные по влиянию пластификаторов на температуру максимального демпфирования $T_{\eta^{\max}}$ пластифицированных ПВА, ПБМА и ПММА.

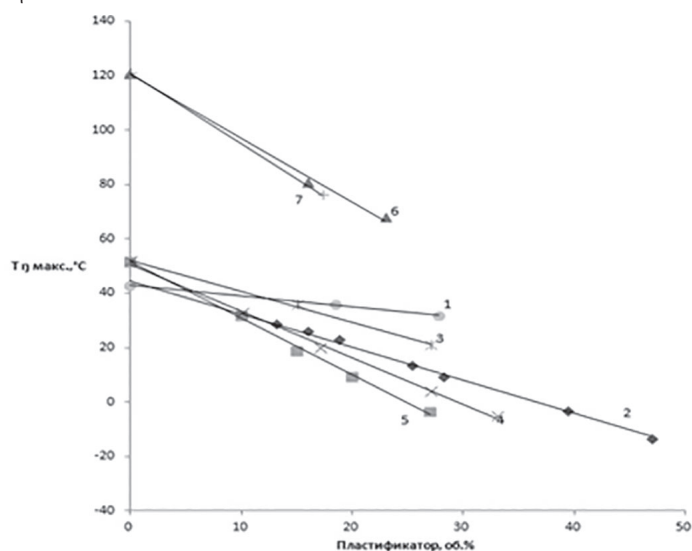


Рис. 2. Зависимость $T_{\eta^{\max}}$ пластифицированных ПВА (1–2), ПБМА (3–5) и ПММА (6–7) от вида и количества введенного пластификатора. Пластификаторы: ХП-52 (1, 3); ТХЭФ (2, 7); ДОФ (4); ТБФ (5); ДБФ (6).

Линейные зависимости $T_{\eta^{\max}}$ от объемной доли введенного пластификатора показывают, что все три полимера совместимы с целым рядом пластификаторов в достаточно широком интервале составов. Это позволяет получить из них простым смешением ряд термопластичных полимерных композиций с различной температурой стеклования и, следовательно, активных в демпфировании при различных температурах (типоряды вибропоглощающих материалов).

На рис. 3 приведены данные по влиянию пластификаторов на коэффициент механических потерь η (рис. 3а) и модуль накопления E' (рис. 3б) для пластифицированных полимерных композиций на основе ПВА, ПБМА и ПММА.

Из сопоставления данных на рис. 3 видно, что динамические механические свойства всех трех материалов (температурный интервал эффективного демпфирования для ПММА сдвинут в область $+60$ – 120°C) имеют между собой много общего:

- введение пластификатора в полимер приводит к снижению температуры максимального демпфирования $T_{\eta^{\max}}$, при этом аб-

солютные значения $\eta^{\max}$ пластифицированных композиций, по крайней мере, не меньше, чем у исходных полимеров;

- высокие значения коэффициентов механических потерь для каждой пленки реализуются в относительно узком интервале температур ($\Delta T_{0,3} \approx 30$ – 40°C), что является общим свойством для гомополимеров;

- зависимости модулей упругости E' от температуры в исследуемом диапазоне имеют выраженные зоны стеклообразного состояния, переходные зоны и области высокоэластичных деформаций. Значения модулей E' при $T_{\eta^{\max}}$ для всех исследованных пластифицированных композиций находятся в интервале от 1 до 20 МПа.

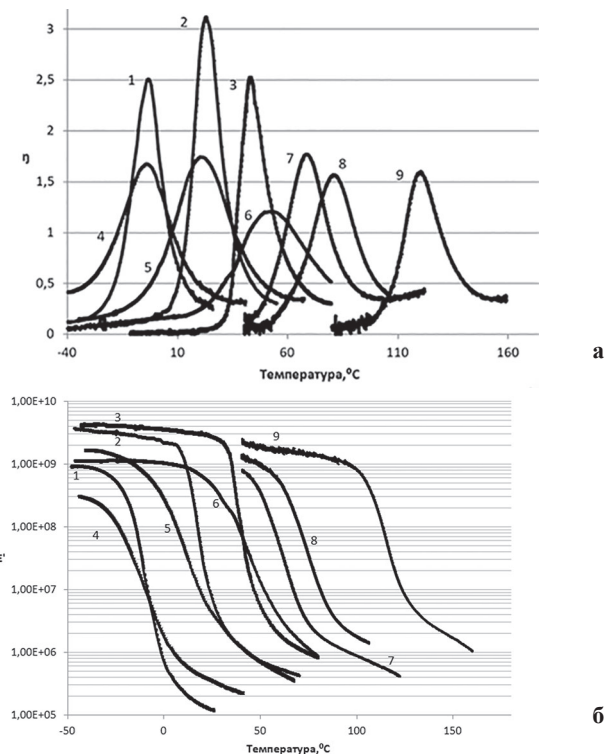


Рис. 3. Зависимость коэффициента механических потерь η и модуля упругости E' (Па) от температуры при динамическом растяжении с частотой 1 Гц для непластифицированных (3, 6, 9) и пластифицированных (1, 2, 4, 5, 7, 8) полимерных пленок на основе ПВА (1, 2, 3), ПБМА (4, 5, 6) ПММА (7, 8, 9) с различным содержанием пластификаторов: трибутилфосфата — 20 об.% (5), 27 об.% (4); трихлорэтилфосфата — 27 об.% (2), 40 об.% (1); дибутилфталата — 10 об.% (8), 20 об.% (7).

В то же время пленки на основе ПБМА и ПММА по абсолютному значению коэффициентов механических потерь при температурах максимального демпфирования уступают соответствующим пленкам на основе ПВА. При этом демпфирующие свойства и модули упругости пленок из ПБМА, по сравнению с пленками из ПВА, в несколько меньшей степени меняются при отклонениях от температуры максимального демпфирования, что связано с более широким спектром времен релаксации. Тот же эффект наблюдается и для пленок из ПММА, хотя он выражен в более слабой степени. Ранее на примере термопластичных пластифицированных композиций из ПВА и ПБМА было показано, что при постоянной температуре, близкой к оптимальной для данной марки, высокие вибродемпфирующие свойства реализуются в широком интервале частот 1–1000 Гц [11, 14]. Достигнутый комплекс свойств позволяет успешно использовать разработанные материалы в различных позициях судостроения и авиастроения [6, 16].

Фактически под действием вибрации вязкоупругая сердцевина сэндвичевой конструкции циклически деформируется при сдвиге из-за относительного движения внешних оболочек сэндвича, что приводит к важному тепловому диссипативному эффекту и, таким образом, к значительному снижению энергии вибрации конструкции. Однако применение толстых вязкоупругих слоев, как уже отмечалось, сильно снижает общую изгибную жесткость конструкции, что нежелательно. Толщина вязкоупругого слоя действует одновременно на два основных вклада в общую энергию деформации: количество или объем вязкоупругого материала, который деформируется под действием вибрации, и величину

относительной деформации сдвига. Хотя вязкоупругий слой малой толщины представляет собой уменьшенный объем для диссипации энергии деформации (что ведет к снижению эффективности демпфирования), этот эффект может быть скомпенсирован за счет значительно большей относительной деформации сдвига, когда внешние части конструкции совершают изгибное движение во время вибрации [17]. Поскольку соотношение этих двух вкладов в общую энергию деформации является индивидуальным свойством каждого вязкоупругого материала и зависит от его строения, принципиальным является изучение возможности демпфирования колебаний в сэндвичевых структурах тонкими и сверхтонкими полимерными пленками. Результаты такого исследования для пленок на основе ПВА и ПБМА в составе трехслойных структур металл-полимерная пленка-металл (М-Р-М) приведены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры трехслойных стержней (рис. 1), содержащих внутренние слои из пленок ПВА (№1–9) и ПБМА (№10–18), η_1 – коэффициент механических потерь при $T = +23^\circ\text{C}$. Содержание пластификаторов: ПВА – 27 об. % ТХЭФ, ПБМА – 25 об. % ТБФ.

№ образца	$h_1 = h_3 = h$, мм	h_2 , мм	h_2/h	f_1 , Гц	η_1
1	3	0,06	0,02	284	0,34
2	3	0,22	0,07	320	0,42
3	3	0,5	0,17	345	0,81
4	2	0,06	0,03	207	0,25
5	2	0,29	0,15	253	0,29
6	2	0,52	0,26	250	0,53
7	1,5	0,1	0,07	178	0,35
8	1,5	0,25	0,17	180	0,55
9	1,5	0,45	0,30	165	0,96
10	3	0,06	0,02	223	0,30
11	3	0,26	0,09	285	0,80
12	3	0,44	0,15	255	0,79
13	2	0,08	0,04	150	0,31
14	2	0,25	0,13	197	0,74
15	2	0,48	0,24	208	0,76
16	1,5	0,10	0,05	140	0,36
17	1,5	0,20	0,13	165	0,66
18	1,5	0,50	0,33	170	0,92

Как следует из экспериментальных данных, представленных в таблице 1, независимо от толщины внешних металлических слоев (h_1 и h_3 , $h_1 = h_3$), с увеличением толщины внутреннего вязкоупругого слоя h_2 , коэффициент механических потерь η_1 возрастает так же, как и значение собственной частоты f_1 . Это свидетельствует о том, что высокое демпфирование для толстых вязкоупругих слоев сопровождается уменьшением жесткости всей трехслойной конструкции М-Р-М [3]. В то же время достаточно высокие коэффициенты механических потерь $\eta_1 \geq 0,3$ достигаются при толщине пленки 0,06–0,1 мм уже при соотношениях $h_2/h_1 = 0,02$.

Исследования влияния толщины вязкоупругого полимерного слоя из термопластичной пластифицированной пленки на основе поливинилацетата (ПВА) марки ВПС-2,5 на эффективность демпфирования армированного вибропоглощающего покрытия подтверждают эти выводы: при толщине полимерного слоя в 0,2 мм удается достичь снижения уровня вибрации на 25–30 дБ в диапазоне частот 1–2500 Гц. Особенно принципиальной является возможность эффективного демпфирования вибрации в области 1–200 Гц, где большинство полимерных материалов не работает [16].

Главным недостатком вибродемпфирующих материалов на основе гомополимеров, как уже отмечалось во введении, является сравнительно узкий температурный диапазон эффективного демпфирования. Этот недостаток может быть в значительной мере компенсирован не за счет варьирования химического состава полимерного компонента, а за счет рационального размещения

нескольких различных пленочных материалов в сэндвичевой конструкции, в частности – путем создания многослойной пленки.

Для оценки демпфирующих свойств комбинированных двух- и трехслойных пленок на основе ПВА было изготовлено три вида образцов (1–3), состоящих каждый из двухслойных комбинированных пленок из ПВА:

1. [ВПНС-4 + ВПС-2,5] – двухслойная пленка из ВПНС-4 и ВПС-2,5;
 2. [ВПС-2,5 + ВПНС-1] – двухслойная пленка из ВПС-2,5 и ВПНС-1;
 3. [ВПНС-4 + ВПНС-1] – двухслойная пленка из ВПНС-4 и ВПНС-1;
- и три вида образцов (4–6), состоящих каждый из трехслойных комбинированных пленок из ПВА:
4. [ВПНС-4 + ВПС-2,5 + ВПНС-1] – трехслойная пленка со средним слоем из ВПС-2,5;
 5. [ВПНС-4 + ВПНС-1 + ВПС-2,5] – трехслойная пленка со средним слоем из ВПНС-1;
 6. [ВПС-2,5 + ВПНС-4 + ВПНС-1] – трехслойная пленка со средним слоем из ВПНС-4.

Во всех двух- и трехслойных комбинированных материалах использовали индивидуальные вязкоупругие пленки с одинаковой толщиной 0,4 мм каждая, разделенные между собой алюминиевой фольгой толщиной 0,05 мм.

ДМА температурные зависимости коэффициентов механических потерь сэндвичевых композитов М-П-М с однослойными, двух- и трехслойными пленками, полученные методом трехточечного изгиба, представлены на рис. 4.

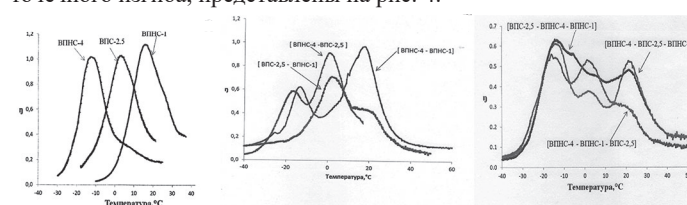


Рис. 4. ДМА температурные зависимости η для сэндвичей вида металл-полимер-металл, с внутренними слоями из термопластичных пластифицированных пленок на основе ПВА: однослойные пленки (4а); двухслойные ПВА пленки (4б); трехслойные ПВА пленки с различным порядком расположения слоев (4в).

Анализируя графики на рис. 4а–4в, можно заметить значительную разницу как в величине коэффициента потерь, так и в ширине температурного интервала демпфирования. М-Р-М композиты с однослойными пленками ВПНС-4, ВПС-2,5 и ВПНС-1 имеют узкий температурный интервал демпфирования ($\Delta T_{0,3} \approx 30^\circ\text{C}$), тогда как при использовании комбинированных двух- или трехслойных пленок наблюдается расширение температурного диапазона демпфирования $\Delta T_{0,3} \approx 60^\circ\text{C}$, хотя максимальные коэффициенты потерь при этом уменьшаются. Из данных на рис. 4в также видно, что эффективность демпфирования трехслойной пленки зависит от порядка внутреннего расположения слоев: максимальный эффект наблюдается в случае, когда внутренним слоем является слой из низкотемпературной пленки ВПНС-4.

Способность разработанных термопластичных пленок обеспечивать эффективную диссипацию колебательной энергии в тонких слоях делает их перспективными компонентами для создания многослойных композитных материалов, обладающих повышенными демпфирующими свойствами [6, 18].

Таким образом, из полибутилметакрилата, поливинилацетата и полиметилметакрилата путем введения различных пластификаторов получены термопластичные пленочные материалы, высокоэффективные в качестве промежуточного вязкоупругого вибропоглощающего слоя в составе металлоконструкций, покрытий с армирующим слоем и в качестве компонента многослойных демпфирующих композитных материалов.

Литература

1. Mohan D. Rao. Recent application of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes. // J. Sound and Vibration. 2003. V. 262. P. 457–474. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00106-8](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00106-8).
2. Nakra B. C. Vibration control in machines and structures using viscoelastic damping. // J. Sound and Vibration. 1998. V. 211. №3. P. 449–465.

3. E.M. Kerwin, Jr., E. E. Ungar. Requirements Imposed on Polymeric Materials by Structural Damping Applications // *Sound and Vibration Damping with Polymers: ACS Symp. Ser. Am. Chem. Soc. Washington, DC, 1990. P. 317–345.*
4. Chen C.P., Lakes R.S. Analysis of high loss viscoelastic composites // *J. Materials Science. 1993. V. 28, P. 4299–4304.*
5. Amr M.Baz. Active and passive vibration damping // *John Wiley & Sons. 2018. P. 752. ISBN: 978-1-118-53760-2.*
6. 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/10.18577/2307-6046-2016-04-9-9 11.*
7. Chakraborty B.C., Debdatta Ratna. Polymer for vibration damping applications // *Elsevier. 2020. P. 348. eBook ISBN: 9780128192535.*
8. Hartmann B. Relation of Polymer Chemical Composition to Acoustic Damping // *Sound and Vibration Damping with Polymers: ACS Symp. Ser. Am. Chem. Soc. Washington, DC, 1990. P. 317–345.*
9. Rong Chen, Haitao Luo, Hongguang Wang, Weijia Zhou. Topology optimization of partial constrained layer damping treatment on plate for maximizing modal loss factors // *Composites and Advanced Materials. 2021. V. 30, P. 1–19.*
10. Нашиф А., Джоунс Д., Хендерсон Дж. Демпфирование колебаний // *Пер. с англ. под ред. Э. И. Григолюка. М.: Мир, 1988. [Nashif Ahid D., Johnes David I. G., Henderson John P. Vibration Damping. John Wiley & Sons, 1985].*
11. Скуратова Т.Б., Кириллов С.Е., Сятковский А.И. Диссипативные свойства полимерных пленок и композитных материалов на основе поливинилацетата // *Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92, №7. С. 881–887.*
12. Сятковский А.И., Скуратова Т.Б., Трофимов Д.Н., Мазур А.С. Влияние параметров композитных материалов на основе поливинилацетата на их диссипативные свойства // *Журнал прикладной химии. 2020, т. 93. Вып. 4, С. 575–580.*
13. Сятковский А.И., Рютянен Е. А., Кудаев А.В., Демпфирование в трехслойных конструкциях металл-полимер-металл с термопластичной пленкой из поливинилацетата // *Noise Theory and Practice, 2022, v. 8, №2, P. 24–34.*
14. Сятковский А. И., Скуратова Т. Б., Трофимов Д. Н., Симонов-Емельянов И. Д. Диссипативные свойства термопластичных полимерных пленок и композитных материалов на основе полибутилметакрилата. // *Материаловедение, 2021, №11, С. 10–16.*
15. Сятковский А. И., Скуратова Т. Б., Крылова Ю. В., Симонов-Емельянов И. Д. Термопластичные пленки для вибропоглощающих материалов с улучшенной водостойкостью. // *Пластические массы, 2021, №1–2, С. 19–21.*
16. Кирпичников В.Ю., Сятковский А.И., Шлемов Ю. Высокоэффективные средства низкочастотного вибродемпфирования с упругим элементом из полимерной пленки // *Судостроение. 2020, №1, С. 44–47.*
17. Sher B. R., Moreira R. A. S. Dimensionless analysis of constrained damping treatments // *Composite Structure. 2013. V. 99. P. 241–254.*
18. Кирпичников В.Ю., Смольников В.Ю., Кудаев А.В., Гусева Е.В., Сятковский А.И. Экспериментальные исследования вибродемпфирующих свойств композитных материалов на основе бумажно-слоистых пластиков HPL, содержащих встроенные слои из термопластичных пленок ВПС-2,5 // *Noise Theory and Practice, 2022, Vol. 8, №4, P. 40–48.*