

Исследование влияния состава и структуры ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами на его демпфирующие и механические характеристики

Investigation of the influence of the composition and structure of PCM with increased vibration absorbing properties on its damping and mechanical characteristics

В.А. САГОМОНОВА, С.С. ДОЛГОПОЛОВ, В. В. ЦЕЛИКИН, А.Е. СОРОКИН

V. A. SAGOMONOVA, S.S. DOLGOPOLOV, V.V. TSELIKIN, A.E. SOROKIN

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»

Государственный научный центр Российской Федерации, г. Москва, РФ

Federal state unitary enterprise "All-Russian scientific research institute of aviation material", State research center of the Russian Federation

(FSUE "VIAM")

valerysgm@gmail.com

В статье приведены результаты анализа влияния состава и структуры ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами на его характеристики. Изготовлены экспериментальные образцы ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами различных вариантов состава и исследованы их основные физические, механические и вибропоглощающие свойства. Установлены факторы, влияющие на уровень свойств изготовленных экспериментальных образцов ПКМ. Определен оптимальный вариант состава и структуры ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, термоэластопласт, вибропоглощающий материал, коэффициент механических потерь, прочность при изгибе, армированный вибропоглощающий материал

The article presents the results of the analysis of the influence of the composition and structure of polymer composite material (PCM) with enhanced vibration damping properties on its characteristics. Experimental samples of PCM of various composition having enhanced vibration damping properties were made and their main physical, mechanical and vibration-absorbing properties were investigated. Factors affecting the level of properties of manufactured experimental samples were determined. The optimal variant of the composition and structure of PCM with enhanced vibration-absorbing properties has been determined.

Keywords: polymer composite material, thermoplastic elastomer, vibration damping material, mechanical loss factor, flexural strength, constrained layer damping material

DOI: 10.35164/0554-2901-2022-1-2-10-13

В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) в качестве конструкционных и функциональных материалов широко применяются в производстве различных видов техники [1–3]. Например, пассажирские и транспортные самолеты имеют в общей массе конструкции свыше 50% ПКМ, военные – 25–30%, вертолетная техника – 45–55%.

Зачастую конструктивные элементы, выполненные из ПКМ, испытывают постоянные и значительные вибрации, подвергая материал интенсивным усталостным напряжениям. Это означает, что комплекс технических требований к ПКМ, применяемым в авиационной технике, должен содержать требования максимальных демпфирующих и усталостных характеристик для всех видов нагружения [4–6].

Однако, как показывает практика [7–14], ПКМ имеют низкие, на уровне металлов, вибропоглощающие свойства. Например, коэффициент механических потерь ($\text{tg}\delta$) углепластика ВКУ-39, стеклопластиков ВПС-47, ВПС-48 при $T = 20^\circ\text{C}$ и частоте 100–1000 Гц составляет 0,001–0,01.

Применение вибропоглощающего покрытия [15, 16] на поверхности ПКМ позволяет существенно повысить коэффициент механических потерь конструкции из ПКМ, однако это приводит к увеличению ее веса, в особенности в случае использования армированных вибропоглощающих материалов.

Например, благодаря применению армированного вибропоглощающего материала марки ВТП-1В-А на поверхности упомянутых выше стекло- и углепластиков удалось повысить их коэффициент механических потерь до значений $\text{tg}\delta = 0,08\text{--}0,13$ при $T = 20^\circ\text{C}$ и частоте 100–1000 Гц. При этом масса 1 м² ПКМ увеличилась почти на 50%.

Альтернативным решением данной проблемы является создание ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами. Исследования, посвященные их разработке, успешно проводятся за рубежом с начала 2000-х годов [17–18]. Предлагается на стадии формирования внедрять вибропоглощающий слой в структуру ПКМ. Под действием изгибающих нагрузок вибропоглощающий слой будет испытывать сдвиговые деформации относительно слоев ПКМ и за счет происходящих в нем процессов внутреннего трения при деформировании рассеивать вибрационную энергию. При этом отпадает необходимость использования дополнительного армирующего слоя, так как в его качестве будут выступать слои ПКМ.

Целью данной работы является изучение влияния состава и структуры ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами на его физические, механические и вибропоглощающие характеристики и выбор оптимального варианта состава экспериментального образца материала.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись экспериментальные образцы ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами различных вариантов состава, включающие армирующий наполнитель, полимерное связующее и вибропоглощающий слой (рис. 1).

В качестве армирующего наполнителя для конструкционных слоев ПКМ были выбраны две конструкционные стеклоткани, полимерного связующего – эпоксиакучуковая клеевая пленка. Вибропоглощающий слой представлял собой пленку из термопластичного полиуретана (ТПУ) толщиной 0,5 мм и 1,0 мм, в ряде случаев содержащую наполнитель на основе технического углерода.

Таблица 1. Состав и схема расположения слоев экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами.

№ варианта	Количество армирующих слоев		Вибропоглощающий слой, толщина, мм	Количество армирующих слоев		Толщина образца, мм
1	4 (стеклоткань №1)		0,5 мм	6 (стеклоткань №1)		3,80
2	4 (стеклоткань №2)		0,5 мм	6 (стеклоткань №2)		3,80
3	4 (стеклоткань №1)		0,5 мм	4 (стеклоткань №1)		2,98
4	4 (стеклоткань №1)		0,5 мм	4 (стеклоткань №1)		2,98
5	4 (стеклоткань №2)		0,5 мм	4 (стеклоткань №2)		2,80
6	4 (стеклоткань №2)		1,0 мм	4 (стеклоткань №2)		3,20
7	4 (стеклоткань №2)		1,0 мм без сажевого наполнителя	4 (стеклоткань №2)		3,10
8	2 (стеклоткань №2)		0,5 мм	6 (стеклоткань №2)		2,70
9	3 (стеклоткань №2)		0,5 мм	5 (стеклоткань №2)		2,75
10	3 (стеклоткань №2)		1,0 мм	5 (стеклоткань №2)		3,05
11	3 (стеклоткань №2)	Вибропоглощающий слой 0,5 мм	2 (стеклоткань №2)	Вибропоглощающий слой 0,5 мм	3 (стеклоткань №2)	3,40

* подразумеваются конструкционные слои, угол выкладки 0°/90°

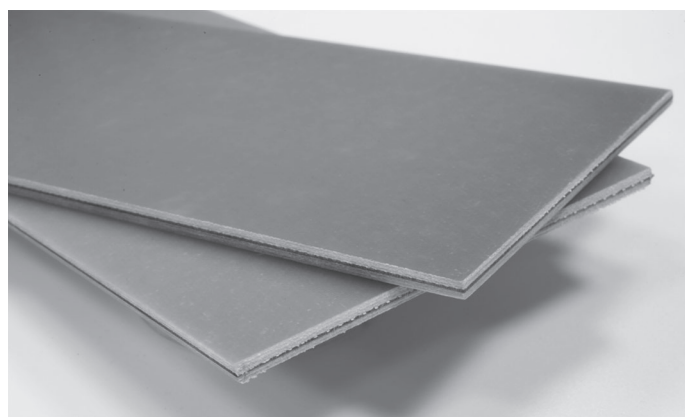


Рис. 1. Внешний вид экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами.

Изготовление экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами осуществлялось посредством прямого контактного горячего прессования при определенных параметрах технологического режима.

Для проведения исследований было изготовлено 11 видов экспериментальных образцов с различными вариантами состава (таблица 1).

Число армирующих слоев материала выбиралось исходя из соответствия толщины и поверхностной плотности готового образца стандартным ПКМ.

Стоит также отметить, что экспериментальные образцы вариантов состава №№1–3 на поверхности имели незначительные вкрапления, предположительно воздушных пузырьков, поэтому в дальнейшем (образцы №№4–11) прессование проводилось при повышенной температуре относительно первых трех вариантов.

Исследование свойств экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами включало следующие показатели: прочность при изгибе при 20°C ($\sigma_{изг.}$), коэффициент механических потерь при 20°C и частоте 100 Гц ($tg\delta$), поверхностную плотность (масса 1 м², P) и прочность связи между слоями (межслойная адгезия, $\sigma_{отсл.}$).

Поверхностную плотность определяли по ГОСТ 6943.16, исследование межслойной адгезии проводили по ГОСТ 411, прочности при изгибе – по ГОСТ 4648, коэффициента механических потерь – по ММ 1. 595-11- 428-2011.

Результаты и их обсуждение

Очевидно, что поверхностная плотность экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами определяется массой 1 м² армирующего наполнителя, связующего и вибропоглощающего слоя (таблицы 1 и 2) и возрастает с увеличением числа слоев или толщины слоя ВТП-1В.

Так, восьмислойные образцы (варианты №№3–11) с внутренним вибропоглощающим слоем толщиной 0,5 мм и 1,0 мм (или двумя слоями толщиной 0,5 мм) имеют поверхностную плотность 4,6–4,9 кг/м² и 5,1–5,3 кг/м² соответственно, в то время как 1 м² десятислойных образцов (варианты №№1, 2) весит 6,1 кг.

Таблица 2. Результаты исследования основных свойств экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами.

№ варианта состава	Коэффициент механических потерь при $T = 20^\circ\text{C}$ и частоте 100 Гц	Прочность при изгибе при $T = 20^\circ\text{C}$, МПа	Поверхностная плотность, кг/м ²
Вариант 1	0,044	340	6,14
Вариант 2	0,040	350	6,15
Вариант 3	0,039	330	4,88
Вариант 4	0,051	320	4,90
Вариант 5	0,050	375	4,60
Вариант 6	0,029	275	5,15
Вариант 7	0,036	260	5,12
Вариант 8	0,026	360	4,70
Вариант 9	0,039	355	4,73
Вариант 10	0,025	270	5,30
Вариант 11	0,079	225	5,20

Межслойная адгезия характеризует монолитность слоистых материалов. В данной работе исследование прочности связи между вибропоглощающим и армирующими слоями представляло особый интерес, поскольку изучался «гибридный материал», сочетающий слой различной структуры и химической природы.

Таблица 3. Результаты определения прочности связи между вибропоглощающими и армирующими слоями экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами.

Состав вибропоглощающего и армирующих слоев	Прочность связи между слоями, Н/мм
пленка из ТПУ толщиной 0,5 мм + эпоксилаучуковая клеевая пленка и стеклоткань №1	6,4
пленка из ТПУ толщиной 0,5 мм + эпоксилаучуковая клеевая пленка и стеклоткань №2	6,2
пленка из ТПУ толщиной 1,0 мм + эпоксилаучуковая клеевая пленка и стеклоткань №2	8,9
пленка из ТПУ толщиной 1,0 мм (без наполнителя) + эпоксилаучуковая клеевая пленка и стеклоткань №2	9,1

Согласно приведенным в таблице 3 данным, все испытанные экспериментальные образцы ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами имеют высокие значения межслойной адгезии ($\sigma_{отсл.} > 6,0$ Н/мм), независимо от вида используемого замасливателя стеклоткани. При этом с увеличением толщины вибропоглощающего слоя прочность связи между слоями возрастает, а наличие наполнителя на основе технического углерода в составе вибропоглощающего слоя практически не влияет на ее величину.

Основным показателем качества изготовленных экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими

свойствами, характеризующим способность материала к рассеиванию вибрационной энергии, является коэффициент механических потерь.

Из представленных в таблице 3 данных видно, что ярко выраженной зависимостью величины коэффициента механических потерь от количества слоев и, соответственно, толщины ПКМ не наблюдается: так, в ряде случаев десятислойные образцы (варианты №№1 и 2) с $\text{tg}\delta = 0,040$ и $0,044$ превосходят восьмислойные (варианты №№3, 6–10), имеющие $\text{tg}\delta$ в диапазоне от $0,025$ до $0,039$, но при этом значительно уступают некоторым образцам меньших толщин (варианты №№4, 5, 11) с $\text{tg}\delta = 0,050$ – $0,079$. Следовательно, на демпфирующие свойства образцов оказывает влияние конфигурация расположения слоев ПКМ.

Симметричные восьмислойные образцы вариантов №№3 и 4 одинакового состава, но изготовленные при различных температурах прессования, существенно отличаются по величине $\text{tg}\delta$ ($0,039$ и $0,051$ соответственно), т.е. повышение температуры переработки положительным образом сказалось не только на внешнем виде образцов ПКМ, но и на их демпфирующих свойствах. Вероятно, это может быть связано со степенью отверждения полимерного связующего (т.е. благодаря более высокой температуре формования образцы более монолитные и прочные), хотя в то же время не находит отражения на межслойной адгезии.

Неожиданно низкие значения коэффициента механических потерь показали результаты испытаний как симметричных образцов №№6 и 7, так и несимметричного №10, имеющих внутренний вибропоглощающий слой толщиной $1,0$ мм: $0,029$, $0,036$ и $0,025$ соответственно. Т.е. в ряде случаев увеличение толщины внутреннего вибропоглощающего слоя приводит к ухудшению демпфирующих свойств образцов ПКМ, содержащих его. При этом образцы с вибропоглощающим слоем, содержащим сажевый наполнитель (вариант №6), уступают аналогичным, его не содержащим (вариант №7). Таким образом, в дальнейшем можно отказаться от использования сажевого наполнителя в составе вибропоглощающего материала, внедряемого в структуру ПКМ.

Из представленных данных также видно, что образцы ПКМ, имеющие симметричное расположение слоев относительно центрального вибропоглощающего слоя, по величине коэффициента механических потерь превосходят несимметричные образцы, причем эта зависимость сохраняется при использовании вибропоглощающего слоя различных толщин (например, варианты образцов №№6 и 10, №№5 и 8, 9). Из сравнения $\text{tg}\delta$ образцов вариантов №№8 и 9 ($0,026$ и $0,039$ соответственно) следует, что увеличение числа слоев ПКМ с одной стороны от центрального вибропоглощающего слоя и уменьшение с другой, т.е. большая «асимметрия» расположения слоев, негативным образом сказывается на демпфирующих свойствах образцов. Вероятно, два чередующихся слоя клеевой пленки и стеклоткани, т.е. два «монослоя» ПКМ уже не выступают в качестве армирующего слоя, вызывающего дополнительные сдвиговые деформации в вибропоглощающем слое ВТП-1В.

Наибольшее значение коэффициента механических потерь ($\text{tg}\delta = 0,079$) имеет симметричный образец варианта состава №11, включающий два вибропоглощающих слоя толщиной $0,5$ мм – он превосходит как симметричные образцы вариантов №№4 и 5, включающие один слой ТПУ толщиной $0,5$ мм и имеющие $\text{tg}\delta = 0,050$ и $0,051$ соответственно, так и образцы №№6 и 8 с ТПУ толщиной $1,0$ мм (и $\text{tg}\delta = 0,029$ и $0,036$ соответственно). Несмотря на то, что суммарная толщина интегрированных вибропоглощающих слоев данного варианта совпадает с последними вышеупомянутыми образцами, значительное различие в величине коэффициента механических потерь подтверждает влияние числа и конфигурации расположения слоев ПКМ. Можно предположить, что здесь наблюдается эффект демпфирования при помощи двух слоев вибропоглощающего материала, т.е. коэффициент механических потерь складывается из $\text{tg}\delta$ двух слоев термоэластопласта, но при этом не является аддитивной суммарной величиной.

Как правило, конструкции из ПКМ обладают высокими прочностными характеристиками, однако наличие внутреннего полимерного вибропоглощающего слоя должно вызвать снижение их механических свойств. Результаты исследования прочности при изгибе ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами приведены в таблице 2.

Из представленных в таблице 2 данных следует, что, как и в случае с демпфирующими свойствами, толщина исследованных образцов не оказывает влияния на прочность при изгибе, и образцы больших толщин (варианты №№1, 2, 11) могут как превосходить по этому показателю образцы меньшей толщины (варианты №№3, 4, 6–8), так и уступать им (варианты №№5, 8, 9).

Выявлено влияние толщины внутреннего вибропоглощающего слоя на прочность при изгибе. Как и следовало ожидать, с ее увеличением прочностные свойства образцов ПКМ снижаются (причем независимо от конфигурации расположения слоев), поскольку снижается доля конструктивных слоев ПКМ, способных нести нагрузку. Конфигурация расположения слоев, в отличие от демпфирующих свойств, оказывает незначительное влияние на прочность при изгибе образцов ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем толщиной $0,5$ мм, при этом наибольшее значение соответствует симметричному восьмислойному образцу варианта состава №5.

Также стоит отметить, что температурный режим прессования в данном случае не оказал значительного влияния на прочность при изгибе (что следует из сравнения образцов вариантов №№3 и 4).

Наименьшим значением прочности при изгибе характеризуется образец №11 – очевидно, что наличие двух вибропоглощающих слоев крайне негативно сказывается на механических свойствах ПКМ.

Исходя из полученных в работе данных, оптимальным сочетанием демпфирующих ($\text{tg}\delta = 0,050$) и механических ($\sigma_{\text{изг}} = 375$ МПа) свойств обладает образец варианта состава №5, включающий восемь чередующихся слоев стеклоткани №2 и эпоксикаучуковой клеевой пленки, расположенных симметрично относительно центрального вибропоглощающего слоя толщиной $0,5$ мм.

Выводы

Установлено, что на величину коэффициента механических потерь ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами оказывает влияние конфигурация расположения конструктивных слоев ПКМ. Причем симметричное размещение конструктивных слоев относительно центрального вибропоглощающего слоя является более эффективным.

Также на вибропоглощающие свойства исследованных экспериментальных образцов оказывают влияние толщина вибропоглощающего слоя (с ее увеличением демпфирующие свойства понижаются), количество вибропоглощающих слоев (в зависимости от их толщины и конфигурации расположения) и температурный режим прессования образцов.

Показано, что на величину прочности при изгибе ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами оказывает влияние состав конструктивных слоев ПКМ и толщина внутреннего вибропоглощающего слоя (с ее увеличением демпфирующие свойства понижаются). Увеличение количества вибропоглощающих слоев негативно сказывается на прочностных характеристиках ПКМ, а конфигурация расположения конструктивных слоев оказывает на них незначительное влияние.

По результатам проведенных исследований установлено, что оптимальным сочетанием демпфирующих и механических свойств обладает образец варианта состава №5.

В качестве дальнейших направлений исследований интерес представляют исследования механизма снижения прочностных свойств ПКМ с повышенными вибропоглощающими характеристиками, а также изучение влияния эксплуатационных (повышенная температура) и ускоренных климатических (термоциклирование, тепловлажностное старение) факторов на механические и вибропоглощающие свойства исследуемого ПКМ.

Литература

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии, 2012. №S. С. 7–17. (189)
2. Каблов Е.Н. Ключевая проблема – материалы // Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М.: ВИАМ, 2015. С. 458–464.
3. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии, 2017. №S. С. 349–367. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367

4. Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // *Авиационные материалы и технологии*, 2017. №S. С. 344–348. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348
5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 // *Авиационные материалы и технологии*, 2015. №1. С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33. (249)
6. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // *Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002*. М.: МИСИС - ВИАМ, 2002. С. 23–47. (36)
7. Кербер М.Л. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. ЦОП «Профессия», 2014. С. 548–562.
8. Multilayer and composition gradient structures with improved damping properties: pat. 8796164 US; publ. 28.06.2012.
9. Structural composite material with improved acoustic and vibrational damping properties: pat. 8450225 US; 28.05.2013.
10. Polymer composites possessing improved vibration damping: appl. 2012/0313307 US; publ. 13.12.2012.
11. Composite components and heat-curing resins and elastomers: appl. 2012/0034833 US; publ. 09.02.2012.
12. Carbon-fiber reinforced plastic composite having improved vibration damping ability: appl. 20120023948 KR; 14.03.2012.
13. Nagasankar S., Balasivanandha P., Velmurugan R. Influence of the Different Fiber lay-ups on the Damping Characteristics of the Polymer Matrix // *Journal of Applied Sciences*. 2012. V. 12(10). P. 1071–1074.
14. Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Тюменева Т.Ю., Большаков В.А. Влияние состава вибропоглощающих материалов на коэффициент механических потерь // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2015. №10. ст.10 URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 25.05.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-10-10.
15. Сагомонова В.А., Сытый Ю.В. Основные принципы создания вибропоглощающих материалов авиационного назначения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №11. ст. 03 URL: <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 25.05.2020).
16. Rao M.D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes // *Journal of Sound and Vibration*. 2003. Vol. 262. P. 457–473.
17. Systems and methods for reducing noise in aircraft fuselages and other structures: pat. 8,042,768 US; 25.10.2011.
18. Improved composite materials: appl. 2011/0268945 US; publ. 03.11.2011.