

УДК 66.017

Г.Ф. Железина¹, А.С. Колобков¹, Г.С. Кулагина¹, А.Ч. Кан¹

ДЕМПФИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ СЛОИСТЫХ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ, ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ И СЛОЕВ ОРГАНОПЛАСТИКА

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-10-19

Исследованы демпфирующие характеристики гибридных слоистых материалов классов «алюминий–органопластик» и «титан–органопластик» на основе металлических листов и слоев арамидного органопластика. Показано, что уровень демпфирующих свойств гибридных слоистых материалов выше, чем в исходных сплавах, и зависит от объемного содержания органопластика, расположения его слоев относительно слоев металла, а также от схемы армирования. Гибридные слоистые материалы являются перспективными материалами для изготовления конструкций высокоскоростной авиационной техники, работающих при высоких виброакустических нагрузках.

Ключевые слова: гибридные слоистые металлополимерные материалы, алюминиевый сплав, титановый сплав, арамидный органопластик, колебания, демпфирование.

G.F. Zhelezina¹, A.S. Kolobkov¹, G.S. Kulagina¹, A.Ch. Kan¹

DAMPING PROPERTIES OF HYBRID LAYERED METAL-POLYMER MATERIALS BASED ON ALUMINUM, TITANIUM ALLOYS AND ORGANOPLASTICS LAYERS

The damping characteristics of hybrid layered materials of the class «aluminum–organoplastics» and «titanium–organoplastics» based on metal sheets and layers of aramid organoplastics are studied. It is shown that the level of damping properties of hybrid layered materials is higher than that of the initial alloys and depends on the volume content of organoplastics, the location of organoplastics layers relative to metal layers, as well as on the reinforcement scheme. Hybrid layered materials are promising materials for the manufacture of high-speed aircraft structures operating under high vibroacoustic loads.

Keywords: hybrid layered metal-polymer materials, aluminum alloy, titanium alloy, aramid organoplastics, vibrations, damping.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Элементы авиационных конструкций в процессе эксплуатации подвергаются воздействию различного рода колебаний и вибраций. Для уменьшения динамической напряженности обшивок и деталей, работающих в зонах с повышенным уровнем виброакустических нагрузок, требуются материалы, способные эффективно гасить колебания и снижать уровень напряжений до безопасного значения. Создание конструкционных материалов с высокими демпфирующими свойствами, способных к рассеянию механической энергии, – важная и актуальная задача, так как в настоящее время требования к скорости и маневренности современных летательных аппаратов постоянно возрастают, а вследствие этого увеличиваются динамические и виброакустические нагрузки при их эксплуатации [1–4].

Один из путей решения проблемы повышения демпфирующих характеристик элементов авиационных конструкций – это создание гибридных слоистых металлополимерных материалов, состоящих из чередующихся слоев металла и полимерного композита (стекло-, угле- или органопластика). Полимерные композиционные материалы, армированные высокопрочными стеклянными, углеродными и арамидными волокнами, значительно превосходят металлические сплавы по способности к демпфированию механических колебаний [5, 6]. Благодаря этому слои полимерного композита в составе гибридного слоистого металлополимерного материала способны выполнять функцию демпфера по отношению к металлическим слоям и способствовать повышению виброакустической стойкости слоистого материала.

Создание гибридных металлополимерных материалов на основе металлических сплавов и полимерных композитов – перспективное направление в авиационном материаловедении, позволяющее реализовать положительные качества разнородных конструкционных материалов (металла и полимерного композита) и решить ряд проблем, не решаемых традиционными способами совершенствования металлических сплавов. Так, сочетание алюминиевых сплавов с пластиком, армированным арамидными или стеклянными волокнами, дает возможность кардинально повысить стойкость металлических слоев к распространению усталостных трещин [7–13].

Во ФГУП «ВИАМ» разработаны гибридные слоистые материалы класса АЛОР, состоящие из тонких листов алюминиевого сплава и слоев высокопрочного органопластика на основе арамидных волокон [14, 15], а также слоистые материалы класса СИАЛ, состоящие из листов алюминиевого сплава и слоев стеклопластика [4, 5]. Данные гибридные слоистые материалы имеют высокие усталостную долговечность и стойкость к распространению усталостных трещин, что является важным преимуществом перед типовыми алюминиевыми обшивками. Рост усталостных трещин в обшивках из материала класса АЛОР происходит в 5 раз медленнее, чем в типовых алюминиевых обшивках, а акустическая выносливость увеличивается в 10 раз [16].

Цель данной работы – показать возможность создания гибридных слоистых материалов на основе алюминиевых и титановых сплавов, превосходящих по уровню демпфирующей способности исходные металлические сплавы. В статье приведены результаты исследования демпфирующих характеристик гибридных слоистых металлополимерных композитов в зависимости от их состава, структуры и свойств, а также от объемного соотношения слоев металла и органопластика, схемы армирования, порядка расположения металлических и полимерных слоев относительно друг друга и других факторов.

Материалы и методы

Объектом исследования являются гибридные слоистые материалы двух классов – «алюминий–органопластик» и «титан–органопластик».

Исследуемый материал класса «алюминий–органопластик» состоит из листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ толщиной 0,47 мм и слоев органопластика толщиной от 0,15 до 0,45 мм (в зависимости от типа арамидной ткани марки СВМ и количества ее слоев в слое органопластика). Свойства армирующих арамидных волокон СВМ следующие: плотность 1400 кг/м³, прочность при растяжении 3800 МПа и модуль упругости 110 ГПа.

Исследуемый материал класса «титан–органопластик» состоит из листов титанового сплава ВТ35 толщиной 0,4 мм и слоев органопластика толщиной 0,2 мм, армированных однонаправленной тканью из арамидных волокон Руслан. Свойства арамидных волокон Руслан следующие: плотность 1400 кг/м³, прочность при растяжении 5000 МПа и модуль упругости 150 ГПа.

Листы гибридных слоистых материалов «алюминий–органопластик» и «титан–органопластик» изготавливали методом автоклавного формования пакета, собранного из тонких листов металла, слоев армирующей ткани (равнопрочной или однонаправленной структуры) и слоев клеевой пленки, используемой в качестве полимерного связующего. Для изготовления материала класса «алюминий–органопластик» использовали клеевую пленку ВК-41 (на основе эпоксидных смол и нитрильного каучука), отверждаемую при допустимом для алюминиевого сплава нагреве до температуры 120 °С. В состав материала класса «титан–органопластик» входит эпoxисульфоновая клеевая пленка ВК-36, отверждаемая при нагреве до температуры 170 °С, что допустимо для титанового сплава ВТ-35.

Листы алюминиевого сплава Д16ч.-АТ (серийные) предварительно подвергали анодному окислению в хромовокислотном электролите для обеспечения их коррозионной стойкости и повышения прочности адгезионного соединения со слоем органопластика.

Листы титанового сплава ВТ-35 толщиной 0,4 мм изготавливали из подката толщиной 2,3–2,5 мм путем последовательных теплой и холодной прокаток, совершаемых за несколько проходов. С целью упрочнения тонких листов и исключения их коробления проводили термообработку. Титановые листы под склейку подготавливали путем последовательной активации поверхности в растворах азотной и плавиковой кислот, ее обработки в растворе щелочи и промывки в воде.

Образцы для проведения физико-механических испытаний изготавливали из листов гибридных слоистых материалов методом механической обработки.

Демпфирующие характеристики гибридных слоистых металлополимерных материалов и их компонентов (металла и органопластика) исследовали при различных видах колебаний: крутильных, поперечных изгибных и продольных. Тангенс угла механических потерь (коэффициент механических потерь) и динамический модуль упругости определяли методами динамического механического анализа по ГОСТ Р 56801–2015 (колебания продольные), ГОСТ Р 56802–2015 (колебания крутильные) и ГОСТ Р 56803–2015 (колебания изгиба).

Для количественной оценки демпфирующих свойств материалов использовали следующие характеристики: тангенс угла механических потерь ($\operatorname{tg}\delta$), логарифмический декремент затухания колебаний (λ) и коэффициент относительного рассеяния энергии (Ω). Тангенс угла механических потерь связан с логарифмическим декрементом через выражение $\operatorname{tg}\delta \sim \lambda/\pi$.

Если величина логарифмического декремента затухания колебаний невелика (что свойственно алюминиевым и титановым сплавам), между ним и коэффициентом относительного рассеяния энергии имеет место зависимость $\lambda=2\Omega$.

Результаты и обсуждение

Известно, что демпфирование колебаний происходит в результате рассеивания энергии, затрачиваемой на деформирование материала, его структурные изменения и разогрев в результате внутреннего трения. Процесс рассеяния энергии в гибридных слоистых металлополимерных материалах происходит одновременно в слоях металла, полимерной матрице и армирующих волокнах, а также на внутренних границах раздела полимерной матрицы с металлом и волокном [17–21].

Способность гибридных слоистых металлополимерных материалов к рассеянию механической энергии зависит от многих факторов: свойств и объемного соотношения слоев металла и органопластика, схемы армирования слоев органопластика, порядка расположения металлических и полимерных слоев относительно друг друга и т. д.

На рис. 1 представлены результаты определения тангенса угла механических потерь гибридного слоистого материала класса «алюминий–органопластик» и его компонентов

(алюминиевого сплава Д16ч.-АТ, арамидного органопластика на основе ткани СВМ и полимерной матрицы ВК-41) методом свободных крутильных колебаний при частоте 1 Гц.

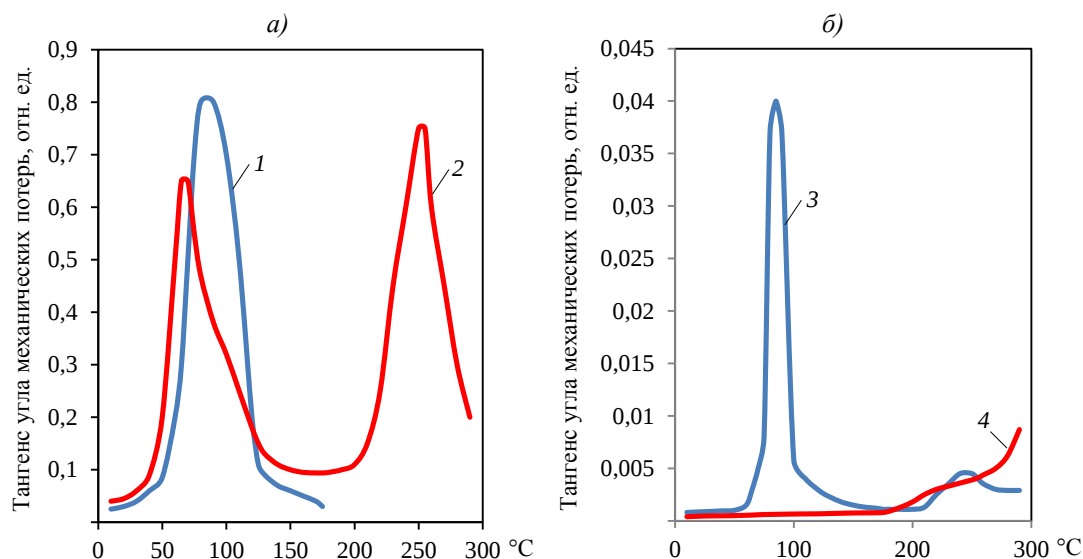


Рис. 1. Зависимость тангенса угла механических потерь от температуры для полимерной матрицы ВК-41 (1), органопластика на основе ткани СВМ и полимерной матрицы ВК-41 (2), а также для пятислойного гибридного слоистого металлополимерного материала класса «алюминий–органопластик» (3) и алюминиевого сплава Д16ч.-АТ (4)

Значения тангенса угла механических потерь материала класса «алюминий–органопластик» и его компонентов зависят от температуры испытаний. Пиковые значения механических потерь в данном материале наблюдаются при температурах, соответствующих фазовым переходам, происходящим в слоях органопластика. При температуре ~85 °C происходит переход полимерной матрицы ВК-41 из стеклообразного в высокоэластическое состояние. Пик тангенса механических потерь при температуре ~250 °C соответствует изменениям надмолекулярной структуры арамидных армирующих волокон. Для слоев алюминиевого сплава зависимость тангенса механических потерь от температуры проявляется в меньшей степени, чем для слоев органопластика. Изменение тангенса угла механических потерь алюминиевого сплава при температуре >200 °C связано, по-видимому, с процессами вязкого скольжения по границам зерен в кристаллической структуре сплава.

Сопоставление температурных зависимостей тангенса угла механических потерь материала класса «алюминий–органопластик», алюминиевого сплава и органопластика показывает, что механические потери в слоистом гибридном материале в 2,5–3,0 раза больше, чем в алюминиевом сплаве Д16ч.-АТ. Повышенная демпфирующая способность такого материала, по сравнению с алюминиевым сплавом Д16ч.-АТ, является следствием слоистости структуры гибридного материала, наличия внутренних границ раздела и эффективного выполнения слоями органопластика роли внутреннего демпфера колебаний.

Демпфирующая способность гибридного слоистого материала класса «алюминий–органопластик» возрастает с увеличением объемного содержания органопластика – компонента, в котором рассеяние энергии колебаний происходит наиболее интенсивно. В качестве примера на рис. 2 показано, что коэффициент рассеяния энергии продольных колебаний данного гибридного материала возрастает с 0,02 до 0,05 отн. ед. с увеличением содержания органопластика в материале с 14 до 39% (объемн.).

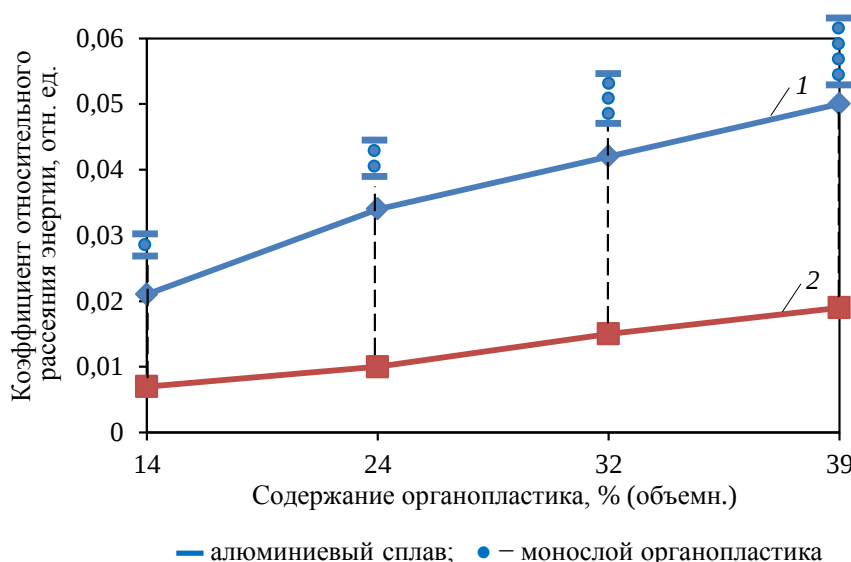


Рис. 2. Зависимость демпфирующей способности гибридного слоистого материала класса «алюминий–органоупластик» от объемного содержания органоупластика при продольных (1) и поперечных изгибных колебаниях (2)

На демпфирующую способность гибридного материала класса «алюминий–органоупластик» оказывает влияние не только объемное содержание органоупластика, но и порядок его расположения относительно слоев металла. На рис. 3 показано, что при поперечных изгибных колебаниях гибридного слоистого материала наименьшее рассеяние энергии наблюдается при расположении слоев органоупластика в срединной плоскости. Логарифмический коэффициент затухания колебаний данного материала увеличивается в 3,5 раза при разнесении слоев органоупластика относительно срединной плоскости и при их расположении на внешних поверхностях материала. При продольных колебаниях зависимость демпфирующих свойств от расположения слоев органоупластика не наблюдается.

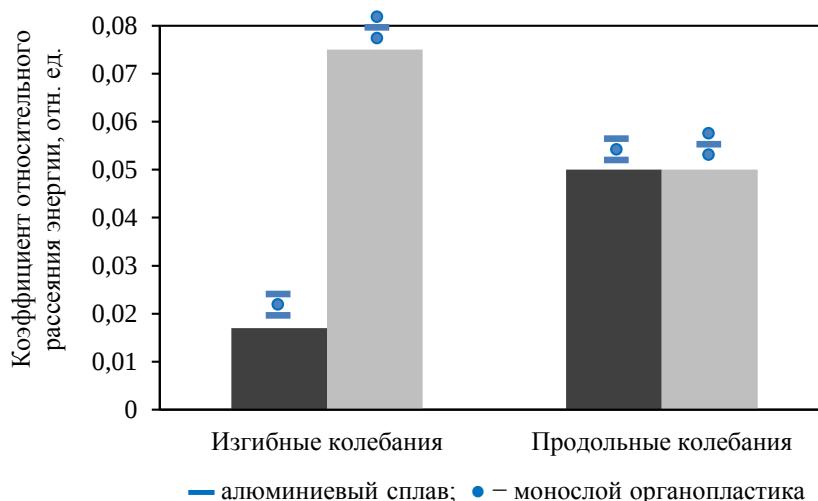


Рис. 3. Влияние схемы расположения слоев органоупластика толщиной 0,15 мм и алюминевого сплава Д16ч.-АТ толщиной 0,47 мм на демпфирующую способность материала класса «алюминий–органоупластик» при изгибных и продольных колебаниях

Гибридным металлополимерным материалам, как и армированным полимерным композитам, свойственна анизотропия физико-механических свойств [22, 23]. Упруго-прочностные свойства гибридных металлополимерных материалов классов «алюминий–органопластик», «алюминий–углепластик» и «алюминий–стеклопластик» зависят от типа армирования (однонаправленное, перекрестное и др.), расположения армирующих волокон по отношению к направлению действующих нагрузок и др. [24].

В данной работе исследовали, как проявляется анизотропия гибридного слоистого материала класса «алюминий–органопластик» однонаправленной структуры (расположение всех армирующих волокон в слоях органопластика совпадает с направлением проката листов алюминиевого сплава Д16ч.-АТ) в отношении демпфирующих характеристик. Испытания выполняли с использованием метода поперечных колебаний при уровне относительной деформации 0,1%. На рис. 4 приведены зависимости логарифмического декремента затухания колебаний и динамического модуля упругости от угла армирования. При изменении угла армирования от 0 до 45 градусов логарифмический декремент затухания материала класса «алюминий–органопластик» увеличивается в 3,5 раза, а затем его величина монотонно снижается. При угле армирования 90 градусов величина логарифмического декремента остается в 2,5 раза больше, чем при угле армирования 0 градусов.

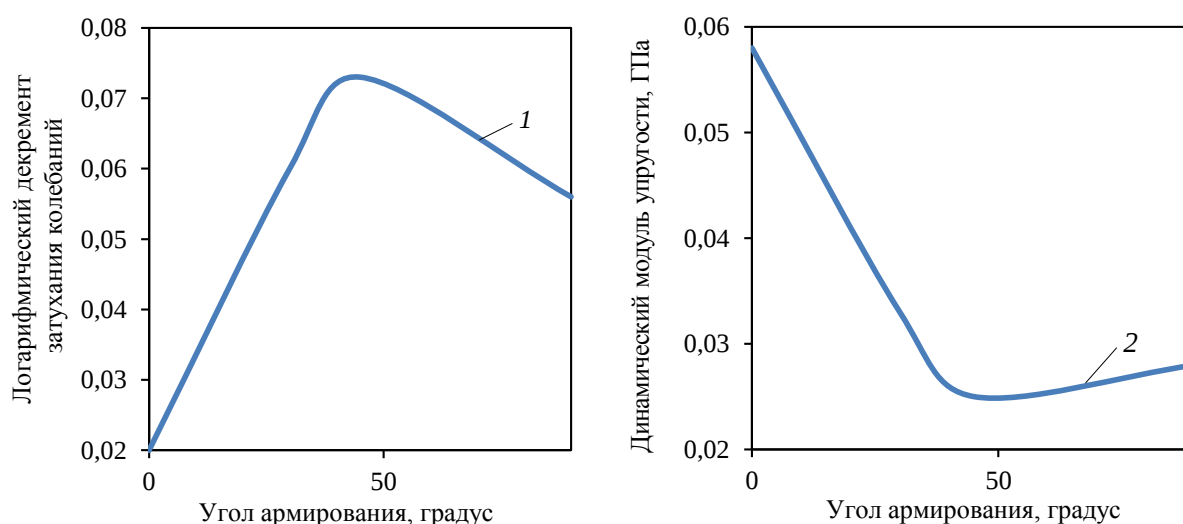


Рис. 4. Зависимость логарифмического декремента затухания колебаний (1) и динамического модуля упругости (2) гибридного слоистого однонаправленного материала класса «алюминий–органопластик» от направления вырезки образца по отношению к направлению армирования

В табл. 1 приведены физико-механические свойства гибридного слоистого металлополимерного материала класса «алюминий–органопластик» и его компонентов – алюминиевого сплава Д16ч.-АТ и органопластика.

Проведенные исследования показали, что наиболее значимыми структурными факторами, влияющими на уровень демпфирующей способности гибридного слоистого материала класса «алюминий–органопластик», являются объемное соотношение слоев металла и органопластика, расположение слоев органопластика относительно слоев металла, а также схема армирования и направление действующих нагрузок относительно армирующих волокон. Демпфирующие характеристики данного материала зависят от температуры и достигают пиковых значений при температуре фазовых переходов в слоях органопластика.

**Физико-механические свойства гибридного материала класса
«алюминий–органопластик», алюминиевого сплава Д16ч.-АТ
и перекрестно-армированного органопластика**

Материал	Состав и структура	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Логарифмический декремент затухания колебаний
Гибридный слоистый материал класса «алюминий–органопластик»	3 листа из сплава Д16ч.-АТ толщиной по 0,47 мм и 2 слоя органопластика по 0,15 мм на основе ткани СВМ и связующего ВК-41	2520	490	62	0,025
	2 листа из сплава Д16ч.-АТ толщиной по 0,47 мм и 1 слой органопластика 0,15 мм на основе ткани СВМ и связующего ВК-41	2590	480	63	0,021
Алюминиевый сплав Д16ч.-АТ	Лист толщиной 0,47 мм	2780	440	69	0,0065
Перекрестно-армированный органопластик	Армирующий наполнитель: равнопрочная ткань СВМ; связующее ВК-41	1350	700	30	0,036
Примечание. Приведены значения упруго-прочностных свойств гибридного слоистого материала класса «алюминий–органопластик» и органопластика для образцов, вырезанных в направлении армирования.					

Известно, что для металлических сплавов характерна тенденция снижения демпфирующей способности при увеличении жесткости и прочности. В связи с этим проблема обеспечения стойкости к виброакустическим нагрузкам и снижения динамической напряженности особенно актуальна для элементов авиационных конструкций, выполненных из титановых сплавов, обладающих высокими упруго-прочностными характеристиками. Гибридные слоистые материалы класса «титан–углепластик» имеют преимущества, по сравнению с титановыми сплавами, по плотности и вязкости разрушения [24, 25]. В данной работе исследовали возможность повышения демпфирующих характеристик титановых сплавов путем их сочетания с высокопрочным арамидным органопластиком в составе гибридного слоистого металлополимерного материала.

В табл. 2 представлены физико-механические свойства гибридного слоистого металлополимерного материала класса «титан–углепластик», состоящего из 3 листов титанового сплава ВТ-35 толщиной 0,4 мм, а также из 2 слоев органопластика на основе однонаправленной ткани из арамидного волокна Руслан и эпоксисульфонового связующего ВК-36. Для сравнения приведены свойства титанового сплава ВТ-35 и арамидного органопластика, используемого в составе гибридного материала. Логарифмический декремент затухания колебаний у гибридного слоистого материала класса «титан–органопластик» в 3,4 раза больше, чем у исходного титанового сплава, при объемном соотношении металла и органопластика 75:25.

На рис. 5 в обобщенном виде показаны демпфирующие характеристики конструкционных материалов различных классов: типовых полимерных композиционных материалов (стекло-, угле- и органопластик), металлических авиационных сплавов и гибридных слоистых металлополимерных материалов.

Таблица 2

Физико-механические свойства гибридного материала класса «титан–органопластик», титанового сплава ВТ-35 и однонаправленного органопластика

Материал	Состав и структура	Плотность, кг/м ³	Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости, ГПа	Логарифмический декремент затухания колебаний
Гибридный слоистый материал класса «титан–органопластик»	3 листа из сплава ВТ-35 толщиной по 0,4 мм и 2 слоя органопластика по 0,2 мм на основе однонаправленной ткани Руслан и связующего ВК-36	3860	1175	105	0,012
Титановый сплав ВТ-35	Лист толщиной 0,40 мм	4700	1100	110	0,0035
Однонаправленный органопластик	Армирующий наполнитель: однонаправленная ткань Руслан; связующее ВК-36	1360	1400	89	0,029
Примечание. Приведены значения упруго-прочностных свойств для образцов, вырезанных в направлении армирования.					

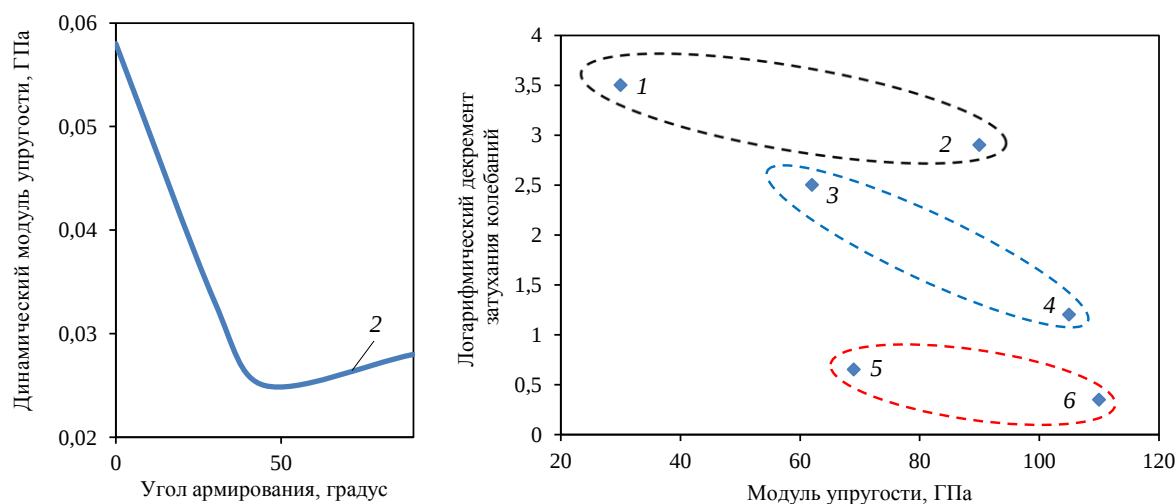


Рис. 5. Жесткость и демпфирующая способность различных конструкционных материалов – органопластиков равнопрочного (СВМ+ВК-41 – 1) и однонаправленного (Руслан+ВК-36 – 2), гибридных слоистых материалов классов «алюминий–органопластик» (Д16ч.-АТ+органопластик равнопрочный – 3) и «титан–органопластик» (ВТ-35+органопластик однонаправленный – 4), а также алюминиевого (Д16ч.-АТ – 5) и титанового (ВТ-35 – 6) сплавов

Как видно из данных, представленных на рис. 5, гибридные слоистые материалы обладают важным для авиационных материалов сочетанием свойств – высокой конструкционной жесткостью и способностью к демпфированию колебаний, что позволяет эффективно снижать динамическую напряженность конструкций в условиях высоких виброакустических нагрузок, характерных для эксплуатации перспективных высокоскоростных авиационных изделий.

Заключения

Исследованы демпфирующие характеристики гибридных слоистых материалов классов «алюминий–органопластик» и «титан–органопластик», состоящих из тонких металлических листов и слоев органопластика, армированных арамидными волокнами.

Установлено, что демпфирующие свойства гибридных слоистых металлополимерных материалов в 2,5–3,5 раза выше, чем у исходных металлических сплавов. Это является следствием эффективного гашения колебаний слоями органопластика, выполняющими роль внутреннего демпфера колебаний, а также слоистости структуры гибридного материала и наличия внутренних границ разделов «металл–полимер» и «арамидное волокно–полимер».

Уровень демпфирующих свойств гибридных слоистых материалов классов «алюминий–органопластик» и «титан–органопластик» зависит от объемного соотношения слоев металла и органопластика, расположения слоев органопластика относительно слоев металла и схемы армирования.

Гибридные слоистые материалы, не уступающие по уровню упругопрочностных свойств металлическим сплавам, но превосходящие их по демпфирующей способности, являются перспективными материалами для высокоскоростной авиационной техники, элементы которой подвергаются воздействию предельно высоких виброакустических нагрузок.

Библиографический список

1. Ярцев Б.А. Композиционные вибропоглощающие конструкции // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. №2 (388). С. 55–68.
2. Иванов А.В., Письмаров М.Н., Куфтин А.А. Исследование демпфирующих свойств конструкционных металлических материалов для защиты бортовой аппаратуры // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 8. С. 304–306.
3. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
5. Mashinskaya G.P., Zhelezina G.F., Senatorova O.G. Laminated Fibrous Metal – Polymer Composites. Soviet Advanced Composites Technology Series // Metal Matrix Composites. 1995. Vol. 3. P. 487–570.
6. Демешкин А.Г., Козеко М.Е., Корнев В.М., Кургузов В.Д. Демпфирующие характеристики композитных конструкционных материалов, изготовленных намоткой // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. №1. С. 190–195.
7. Podzhivotov N.Y., Kablov E.N., Antipov V.V., Erasov V.S., Serebrennikova N.Yu., Abdullin M.R., Limonin M.V. Laminated Metal–Polymeric Materials in Structural Elements of Aircraft // Inorganic Materials: Applied Research. 2017. Vol. 8. No. 2. P. 211–221.
8. Антипов В.В., Котова Е.В., Серебренникова Н.Ю., Петрова А.П. Клеевые связующие и клеевые препреги для алюмополимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2018. №5 (65). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-5-44-54.
9. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмостеклопластиков на основе алюминий–литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. №S2. С. 174–183.
10. Каблов Е.Н. Композиты сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
11. Антипов В.В., Сидельников В.В., Самохвалов С.В., Шестов В.В., Нефедова Ю.Н. Возможности применения алюмостеклопластиков в обшивках фюзеляжа самолета // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. №1. С. 77–82.
12. Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Ерасов В.С., Каширин В.В. Гибридные слоистые материалы на базе алюминий–литиевых сплавов применительно к панелям крыла самолета // Авиационные материалы и технологии. 2016. №3 (42). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-3-3-8.

13. Гуняев Г.М., Железина Г.Ф., Ильченко С.И. Слоистые металлополимерные композиты на основе алюминиевых и титановых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2002. Вып.: Полимерные композиционные материалы. С. 50–58.
14. Антипов В.В., Серебренникова Н.Ю., Шестов В.В., Сидельников В.В. Слоистые гибридные материалы на основе листов из алюминий-литиевых сплавов // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 212–224. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-212-224.
15. Деев И.С., Железина Г.Ф. Фрактографический анализ слоистого металлополимерного композита АЛОР после испытаний на трещиностойкость // *Композиты и наноструктуры*. 2015. Т. 7. №3. С. 162–176.
16. Димитриенко Ю.И., Губарев Е.А., Федонюк Н.Н., Яковлев Д.О. Метод расчета рассеяния энергии в конструкциях из гибридных композитов // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2014. Вып. 11 (656). С. 12–24. DOI: 10.18698/0536-1044-2014-11-12-24.
17. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А. Вибропоглощающие материалы на основе термоэластопластов // *Труды ВИАМ*. 2013. №3. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2020).
18. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А. Основные принципы создания вибропоглощающих материалов авиационного назначения // *Труды ВИАМ*. 2013. №11. Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2020).
19. Платонов М.М., Шульдешов Е.М., Нестерова Т.А., Сагомонова В.А. Акустические полимерные материалы нового поколения // *Труды ВИАМ*. 2016. №4 (40). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9.
20. Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Тюменева Т.Ю., Большаков В.А. Влияние состава вибропоглощающих материалов на коэффициент механических потерь // *Труды ВИАМ*. 2015. №10. Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-10-10.
21. Железина Г.Ф., Гуляев И.Н., Соловьева Н.А. Арамидные органопластики нового поколения для авиационных конструкций // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 368–378. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-368-378.
22. Железина Г.Ф., Войнов С.И., Соловьева Н.А., Кулагина Г.С. Арамидные органотекстолиты для ударостойких авиационных конструкций // *Журнал прикладной химии*. 2019. Т. 92. Вып. 3. С. 358–365.
23. Войнов С.И., Железина Г.Ф., Ильичев А.В., Соловьева Н.А. Исследование механических характеристик слоистого металлополимерного композиционного материала на основе листов алюминия и слоев углепластика // *Вопросы материаловедения*. 2018. №4 (96). С. 86–97.
24. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Путырский С.В., Крохина В.А. Титанополимерные слоистые материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. №S2 (44). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
25. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // *Труды ВИАМ*. 2015. №10. Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.