

На правах рукописи

САГОМОНОВА ВАЛЕРИЯ АНДРЕЕВНА

**СЛОИСТЫЕ ВИБРОПОГЛОЩАЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ
ТЕРМОЭЛАСТОПЛАСТОВ И ОРГАНИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
И ТЕХНОЛОГИЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Специальность 05.17.06 «Технология и переработка полимеров и композитов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2021 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» (ФГУП «ВИАМ»)

Научный руководитель: **Петрова Алефтина Петровна**
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
ФГУП «ВИАМ»

Официальные оппоненты: **Люсова Людмила Ромуальдовна**
доктор технических наук, профессор,
заведующая кафедрой «Химии и технологии
переработки эластомеров
им. Ф.Ф. Кошелева», ФГБУО ВО «МИРЭА –
Российский технологический университет»
Олихова Юлия Викторовна
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технологии переработки
пластмасс», ФГБОУ ВО «Российский хими-
ко-технологический университет
им. Д.И. Менделеева»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Московский авиационный
институт (национальный исследовательский
университет)»

Защита состоится «хх» декабря 2021 г. в хх часов на заседании диссертационного совета Д 403.001.01 при ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17. Тел 8 (499) 267-86-09, e-mail: admin@viam.ru, internet: www.viam.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГУП «ВИАМ» и на сайте www.viam.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, ФГУП «ВИАМ», ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, доцент

Славин А.В.

© ФГУП «ВИАМ», 2021
© Сагомонова В.А., 2021

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Проблема снижения вредных шумов и вибраций, ухудшающих акустическую комфортность и понижающих надежность работы механизмов, особо актуальна для авиационной отрасли. Наиболее острыми являются проблемы защиты от структурного или передающегося по элементам конструкции шума и вибрации в низкочастотном диапазоне, где наблюдаются резонансные колебания конструкций. Возможности снижения шума в салоне самолета с помощью активных методов могут быть реализованы, если они предусмотрены на стадии проектирования, звукоизоляционные волокнистые материалы (пассивные средства снижения шума), как правило, работоспособны в высокочастотном диапазоне (1000-6300 Гц), требуют облицовки, под действием вибрации могут становиться хрупкими и разрушаться. Одним из эффективных способов снижения уровня шума и вибрации внутри транспортных средств является применение в их конструкции материалов с высокими демпфирующими свойствами - вибропоглощающих материалов (ВПМ), наиболее эффективными из которых являются полимерные материалы.

Развитие работ по созданию перспективной авиационной техники невозможно без применения полимерных композиционных материалов (ПКМ), однако, из-за низких вибропоглощающих свойств, элементы конструкции летательных аппаратов из волокнистых композиционных материалов по сравнению с монолитными металлическими материалами требуют более совершенной виброакустической изоляции. Традиционными подходами к повышению вибродемпфирующих характеристик ПКМ является использование связующих, обладающих повышенными вибропоглощающими свойствами, и подбор схемы укладки конструктивных слоев. Однако на практике они оказываются малоэффективными. Применение вибропоглощающих покрытий на ПКМ существенно повышает коэффициент механических потерь конструкции из ПКМ, но приводит к увеличению ее массы на 50-100 %. Также в большинстве случаев изделия из ПКМ имеют поверхность сложной конфигурации, что затрудняет нанесение на нее листовых вибропоглощающих покрытий и армированных ВПМ. Альтернативным решением данной проблемы является интегрирование вибропоглощающих слоев в структуру ПКМ.

Актуальность настоящей работы обусловлена необходимостью снижения вибрации элементов конструкции сложных технических систем, выполненных из металла или ПКМ, за счет применения новых подходов к созданию ВПМ и их интегрированию в структуру конструкций.

Цель работы – разработка слоистых вибропоглощающих материалов, работоспособных при частотах до 1000 Гц и технологий их изготовления и применения:

- для снижения вибрации конструкций и агрегатов, испытывающих одновременное воздействие вибрации и повышенной до 180 °С температуры,

- для изготовления слабонагруженных элементов конструкции сложных технических систем с интегрированным вибропоглощающим слоем.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Анализ существующих разработок вибропоглощающих материалов с повышенной рабочей температурой и способов повышения вибропоглощающих свойств ПКМ;
2. Формулирование основных принципов разработки слоистых вибропоглощающих материалов на основе термоэластопластов и органических волокон;
3. Исследование влияния состава, структуры, конфигурации расположения слоев на вибропоглощающие, акустические, механические и физические свойства слоистых ВПМ;
4. Разработка состава и технологии изготовления слоистого вибропоглощающего материала для применения в качестве покрытия конструкций и агрегатов с повышенной до 180 °С рабочей температурой;
5. Разработка состава и технологии изготовления ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем для изготовления слабонагруженных элементов конструкции сложных технических систем.

Научная новизна работы заключается в формулировании общих принципов разработки слоистых полимерных композиционных материалов с интегрированным вибропоглощающим слоем и слоистых вибропоглощающих материалов на основе термоэластопластов и органических волокон. На основе установленных закономерностей впервые разработаны:

- полимерный композиционный материал с интегрированным вибропоглощающим слоем, имеющий повышенный коэффициент механических потерь $\text{tg}\delta \geq 0,05$ в диапазоне частот 100-500 Гц. Установлено, что интеграция вибропоглощающего слоя в структуру ПКМ обеспечила повышение коэффициента механических потерь и возможность изготовления слабонагруженных элементов конструкции с повышенными вибропоглощающими свойствами непосредственно из данного материала, при этом снижены массовые затраты на применение вибропоглощающих покрытий, повышены экономичность и технологичность изготовления за счет исключения стадии приклеивания вибропоглощающего покрытия. Изучено влияние и определены подходы по регулированию свойств слоистого полимерного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем, осуществляемые за счет комбинирования конструктивных и функциональных слоев.

- слоистый вибропоглощающий материал на основе термостойких полимерных волокон и термопластичного связующего с пониженной поверхностной плотностью в сравнении с аналогами. Для создания термостойкого вибропоглощающего материала применены нетканый материал и ткань из полиоксадиазольных и арамидных волокон соответственно, пленка из модифицированного фторопласта. Показано, что сочетание слоев из указанных материалов обеспе-

чило повышение вибропоглощающих свойств (коэффициента механических потерь и динамического модуля упругости) в широком диапазоне частот (100-1000 Гц) и температур (от -60 до +180 °С). Изучены зависимости коэффициента механических потерь и динамического модуля упругости указанного вибропоглощающего материала от состава и поверхностной плотности его слоев.

- предложены технологии изготовления слоистых вибропоглощающих материалов и применения их в конструкциях.

Практическая значимость работы:

1. Разработан состав полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВТП-1ВД и технология его изготовления, на которую выпущена технологическая рекомендация ТР 1.2.2664-2018 изм. № 1. Получен патент РФ 2687938 «Полимерный композиционный материал с интегрированным вибропоглощающим слоем» опубл. 16.05.2019.

2. Разработан состав листового вибропоглощающего материала, выпущены ТУ 1-595-9-1074-2009 изм.2 и технология его изготовления, на которую выпущена технологическая рекомендация ТР 1-595-9-786-2008 изм.2.

3. На материал листовой вибропоглощающий марки ВТП-3В и ПКМ марки ВТП-1ВД с интегрированным вибропоглощающим слоем разработаны паспорт №1816 и дополнение №5 к паспорту №1633 соответственно.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработка полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем.

2. Подход к регулированию коэффициента механических потерь, прочностных характеристик, межслойной адгезии ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем за счет изменения конфигурации расположения слоев, химической природы вибропоглощающего слоя, связующего и армирующего наполнителя конструкционных слоев.

3. Состав и технология изготовления ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем с повышенными вибропоглощающими свойствами по сравнению с применяемыми в настоящее время слоистыми пластиками.

4. Разработка слоистого вибропоглощающего материала с рабочей температурой до 180 °С на основе армирующих слоев из термостойких полимерных волокон и термопластичного связующего.

5. Влияние состава и массовых характеристик материалов исходных слоев на коэффициент механических потерь и динамический модуль упругости термостойкого слоистого вибропоглощающего материала.

6. Состав и технология изготовления слоистого вибропоглощающего материала с повышенной до 180 °С рабочей температурой по сравнению с применяемыми в настоящее время ВПМ.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием стандартизованных методов испытаний, метрологически аттестованного, поверенного современного оборудования, всесторонними исследованиями большого количества образцов и статистической обработкой значительного объема экспериментальных данных.

Личный вклад автора состоит в методической постановке работы, обобщении и анализе данных в области создания отечественных и зарубежных слоистых вибропоглощающих материалов и способов повышения вибропоглощающих свойств ПКМ, разработке составов термостойкого слоистого вибропоглощающего материала и ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем, а также технологических режимов их изготовления, исследовании свойств и формулировании на основе полученных данных принципов разработки слоистых вибропоглощающих материалов и определении подходов по регулированию свойств ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем.

Внедрение результатов работы. Разработанный материал марки ВТП-3В принят для применения в конструкции изделий АО «Компания «Сухой» (исх. № 1/452091/703 от 19.08.2021). ФГУП «ЦАГИ» ГНЦ РФ проведено исследование звукоизоляции панели из разработанного ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВТП-1ВД в сравнении с панелью из стеклопластика ВПС-47 толщиной 2,7 мм. Установлено, что в области частот от 100 до 6300 Гц звукоизоляция (ЗИ) панели из ВТП-1ВД выше ЗИ панели из ВПС-47 на 3-10 дБ. ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем по результатам исследований является перспективным для изготовления панелей интерьера самолетов с повышенными вибропоглощающими и звукоизоляционными свойствами (исх. № 87-10/252 от 24.08.2021).

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались:

- Всероссийская научно-техническая конференция «Функциональные материалы для снижения авиационного шума в салоне и на местности» (12 марта 2015 г., ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва);

- II Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» (30 ноября 2017 г., ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва);

- III Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения» (29 ноября 2018 г., ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва);

- Международная молодёжная научная конференция «XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых)». (7-8 ноября 2019 г., КНИТУ-КАИ, Казань). Доклад удостоен диплома III степени;

- Всероссийская научно-техническая конференция «Термопластичные материалы и функциональные покрытия. (23 апреля 2019 г., ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 12 научных публикациях, включая 8 публикаций в изданиях, включенных в перечень ВАК, 2 публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus, и 1 патенте.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, литературного обзора (глава 1), 3 глав, выводов, списка использованной литературы из 86 наименований, содержит 33 рисунка, 72 таблицы, изложена на 154 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, отражены основные достигнутые результаты, положения, которые выносятся на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава представляет собой литературный обзор, посвященный разработке вибропоглощающих материалов, их классификации и эволюции от однослойных вибропоглощающих покрытий до ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем для изготовления различных элементов конструкции авиационной техники. Определены основные характеристики (коэффициент механических потерь, комплексный модуль упругости и его компоненты) количественной оценки способности полимерных материалов к демпфированию. Показаны виды деформаций, реализуемые в ВПП и армированных ВПМ, благодаря которым происходит рассеяние вибрационной энергии. Приведены способы повышения вибропоглощающих свойств ПКМ.

Литературный обзор составлен на основании анализа 86 опубликованных источников.

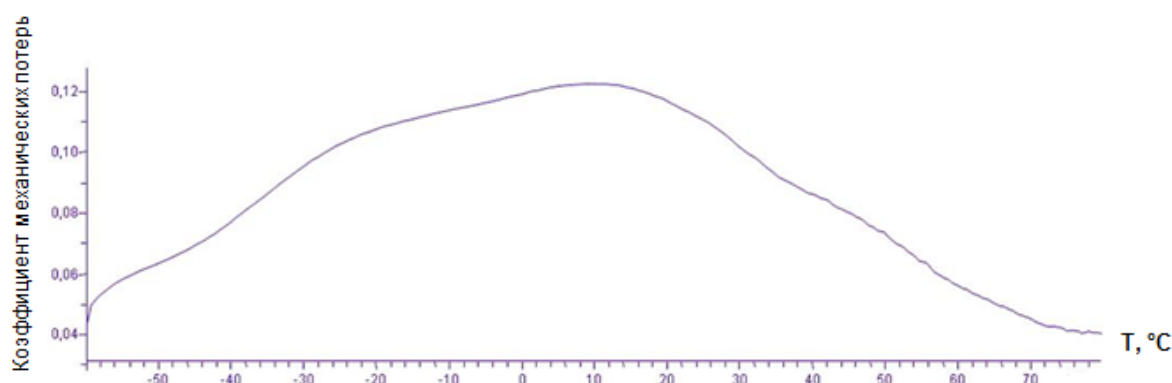
Вторая глава посвящена описанию объектов и методов исследований. Приведены характеристики исходных материалов для создания слоистых ВПМ и ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем, их структура. Описано оборудование и методики определения физических, теплофизических, механических свойств, горючести, неразрушающего контроля материалов. Вибропоглощающие свойства - коэффициент механических потерь ($KМП$, $tg\delta$), комплексный модуль (E^*) и его компоненты (E' и E'') и температура стеклования (T_g) определялись методом динамического механического анализа (ДМА) по СТО 1-595-36-464-2015. Исследования вибропоглощающих свойств проводились в двух режимах деформации – сдвига и трехточечного изгиба с закрепленными концами в диапазоне температур при фиксированной частоте

100 или 1000 Гц или в частотном диапазоне при 23 °С. Во втором случае испытания проводились на образцах, приклеенных к подложке из металла толщиной 1,0 мм.

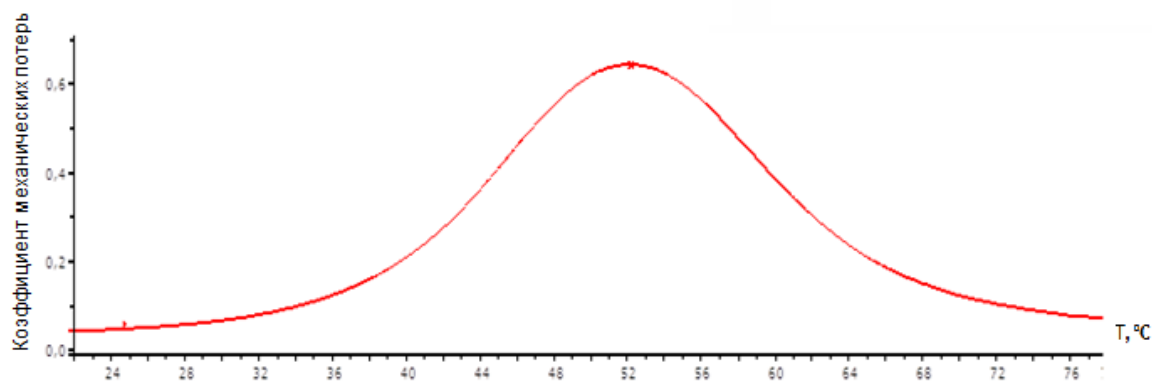
При разработке термостойкого слоистого ВПМ были опробованы ткани и нетканые материалы на основе термостойких арамидных и полиоксадиазольных волокон, термопластичное связующее на основе модифицированного политетрафторэтилена. Для изготовления образцов ПКМ использовали препреги на основе стеклотканей Т-10-14, Т-15(П)-76, Т-64(ВМП)-78, Т-60/2(ВМП)-14 и клеевых связующих ВК-51 и ВСК-14-6. В качестве вибропоглощающего слоя для интегрирования в структуру слоистого пластика использовали пленки на основе термопластичного полиуретана (ТПУ) и модифицированного поливинилацетата (ПВА).

Третья глава состоит из 9 разделов и посвящена формулированию основных принципов создания слоистых ВПМ и разработке составов и технологий изготовления термостойкого слоистого ВПМ и ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем. Включает исследования по влиянию природы вибропоглощающего слоя на КМП однослойных и слоистых ВПП.

Определены температуры стеклования (T_g) вибропоглощающих слоев слоистого пластика - ТПУ и модифицированного ПВА и установлено, что они находятся в диапазоне (-35...-30) и (29...35) °С соответственно. Зависимости КМП слоев на основе ТПУ и ПВА от температуры приведены на рисунках 1, 2 и 3, 4 соответственно.



(а)



(б)

Рисунок 1. Температурная зависимость КМП при частоте 100 Гц в условиях трехточечного изгиба материала на основе ТПУ (а) и ПВА (б).

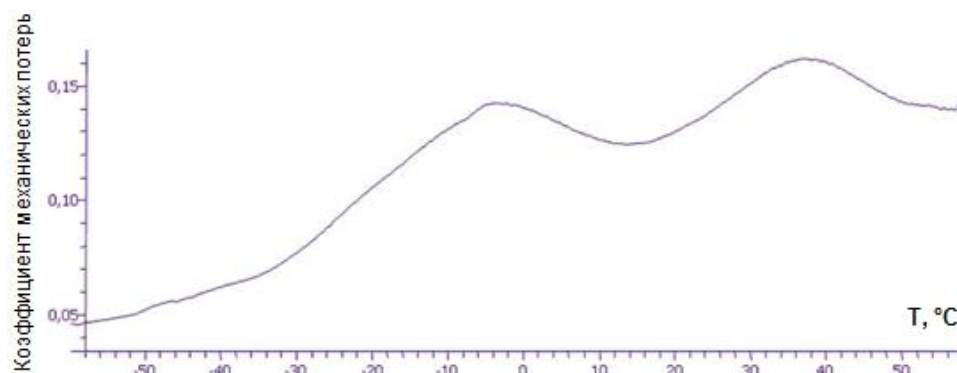


Рисунок 2. Температурная зависимость КМП образцов слоистого вибропоглощающего материала на основе ТПУ и ПВА в условиях трехточечного изгиба при частоте 100 Гц.

Из приведенных на рисунках 1 и 3 графиков видно, что *tgδ указанных материалов достигает наибольших значений в температурном интервале стеклования* - в зоне наиболее активной релаксации ~ на 10...20 °C выше их T_g . Указанные свойства материалов не зависят от метода испытания.

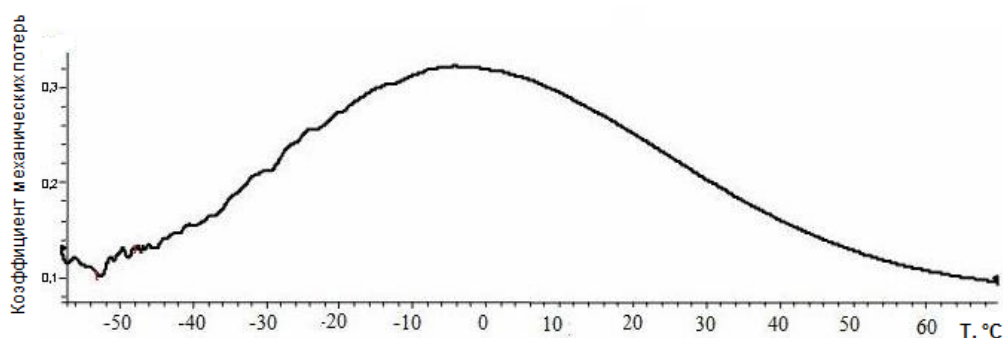


Рисунок 3. Температурная зависимость КМП материала на основе ТПУ в условиях сдвига при частоте 100 Гц.

Исследование по влиянию сочетания слоев на основе ТПУ и модифицированного ПВА на КМП слоистого ВПМ в условиях трехточечного изгиба и сдвигового нагружения показало, что при соединении двух вибропоглощающих слоев наблюдается два пика $tgδ$, характерные для ТПУ и модифицированного ПВА (в области отрицательных и положительных температур соответственно), независимо от метода испытания (рис. 2 и 4). При этом значения КМП материала на основе модифицированного ПВА ($tgδ=0,65$) значительно превосходят показатели для пленки из ТПУ даже в условиях трехточечного изгиба.

Таким образом, *сочетание полимерных слоев, имеющих максимумы вибропоглощения в различных температурных областях, позволяет регулировать температурный диапазон вибропоглощения слоистых материалов*. Однако, независимо от условий испытаний *коэф-*

коэффициент механических потерь слоистого ВПМ не является аддитивной величиной и не является суммой $\text{tg}\delta$ материалов отдельных слоев, входящих в его состав.

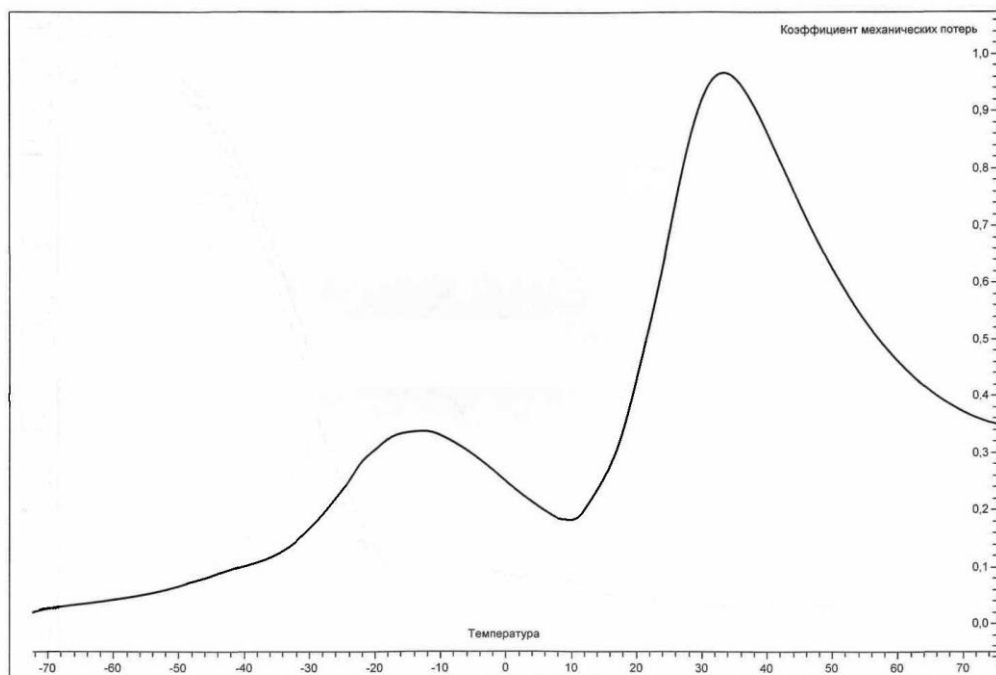


Рисунок 4. Температурная зависимость КМП образцов слоистого вибропоглощающего материала на основе ТПУ и ПВА в условиях сдвигового нагружения при частоте 100 Гц.

Следует отметить, что температуры, соответствующие максимумам $\text{tg}\delta$ материалов на кривых в разных условиях деформирования, совпадают, однако значения КМП по абсолютной величине отличаются. Например, в условиях сдвига при 20 °C КМП слоистого ВПМ превосходит $\text{tg}\delta$ однослойного ТПУ почти в 2 раза, а в условиях трехточечного изгиба указанные ВПМ имеют близкие значения $\text{tg}\delta \approx 0,12$.

Исследования ВПМ - однослойного марки ВТП-1В на основе ТПУ и слоистого марки ВТП-2В на основе ТПУ и ПВА, проведенные в акустической камере ФГУП «ЦАГИ», показали, что применение их в виде покрытий позволяет повысить звукоизоляцию панели фюзеляжа ИЛ-96 на (2-9) дБ в диапазоне частот от 100 до 6300 Гц при комнатной температуре. Результаты испытаний показали, что при частоте 100-1000 Гц покрытия из ВПМ марок ВТП-1В и ВТП-2В имеют одинаковую эффективность звукоизоляции. С учетом этого и упомянутого выше равенства КМП аналогичных ВПМ, определенного в условиях трехточечного изгиба, можно сделать вывод, что *исследование вибропоглощающих свойств в условиях трехточечного изгиба более приближено к условиям работы ВПМ на поверхности элементов конструкции.*

Проведены исследования по влиянию металлического и композиционного армирующих слоев на вибропоглощающие свойства, поверхностную плотность и межслойную адгезию слоистых ВПМ, а также проведен их сравнительный анализ.

Состав исследованных армированных вибропоглощающих материалов (АВПМ) включал вибропоглощающий слой на основе листового материала из ТПУ толщиной $(2,0 \pm 0,1)$ мм, соединенный с армирующим слоем из листового алюминиевого сплава марки Д16-АТ толщиной $(0,5 \pm 0,1)$ мм или монослоев углепластика и стеклопластика.

Из представленных в таблице 1 данных следует, что АВПМ с композиционными армирующими слоями обладают меньшей поверхностной плотностью по сравнению с ВПМ с армирующим слоем из алюминиевого сплава. Также показано, что ВПМ с армирующими слоями из алюминиевого сплава и стеклоткани почти в 2 раза превосходят по значению прочности при расслаивании образцы с армирующим слоем из углеродного волокна. Предположительно, причина заключается в природе компонентов соединяемых армирующих и вибропоглощающего слоев, а также связана с типом использованных замасливателя и аппрета для их наполнителей.

Таблица 1 – Результаты определения физических и механических свойств экспериментальных образцов многослойных АВПМ

Состав экспериментальных образцов вибропоглощающих материалов	Поверхностная плотность, кг/м^2	Прочность при расслаивании, Н/мм
Образцы с армирующим слоем из алюминиевого сплава Д16-АТ	3,55	26,0
Образцы с армирующим слоем на основе ленты-полотна из углеродного волокна УТО-300Т-200 IMS-65 и связующего из клеевой пленки ВК-51	3,20	15,5
Образцы с армирующим слоем на основе стеклоткани Т-10-80 и связующего из клеевой пленки ВК-51	3,40	30,2

Результаты исследования влияния природы армирующего слоя на КМП АВПМ представлены на рисунках 5-7. В качестве контрольных были рассмотрены значения КМП при 20°C и повышенной температуре 100°C .

Таблица 2 – КМП АВПМ с различным направлением выкладки наполнителя армирующего слоя

Состав образцов АВПМ	tgδ* при частоте 100 Гц					
	20 °С				100 °С	
Направление выкладки наполнителя армирующего слоя						
Образцы с армирующим слоем на основе ленты-полотна из углеродного волокна УТО-300Т-200 IMS-65 и связующего из клеевой пленки ВК-51	0°	30°	45°	90°	0°	90°
	0,11	0,11	0,12	0,14	0,10	0,11
Образцы с армирующим слоем на основе стеклоткани Т-10-80 и связующего из клеевой пленки ВК-51	0,11	0,11	0,11	0,12	-	-

*на подложке из алюминиевого сплава Д16-АТ толщиной 1,0 мм

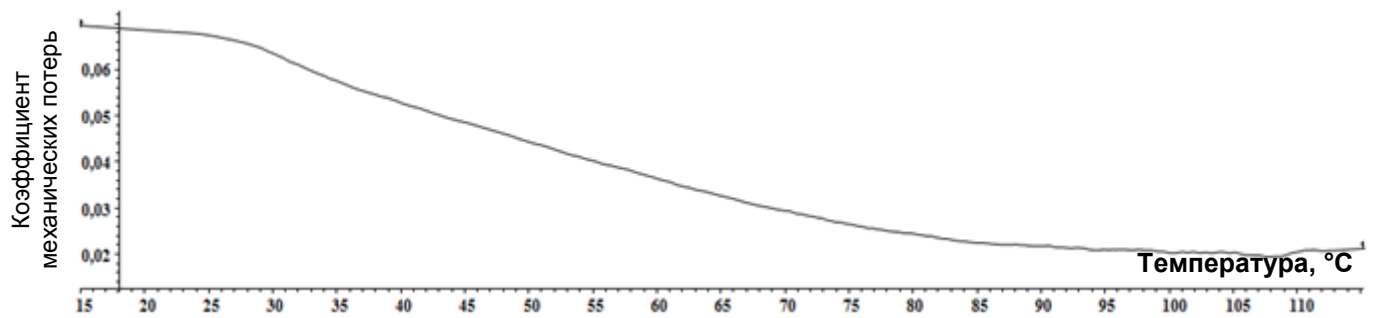


Рисунок 5. Температурная зависимость КМП однослойного ВПП на основе ТПУ (толщиной 2,0 мм).

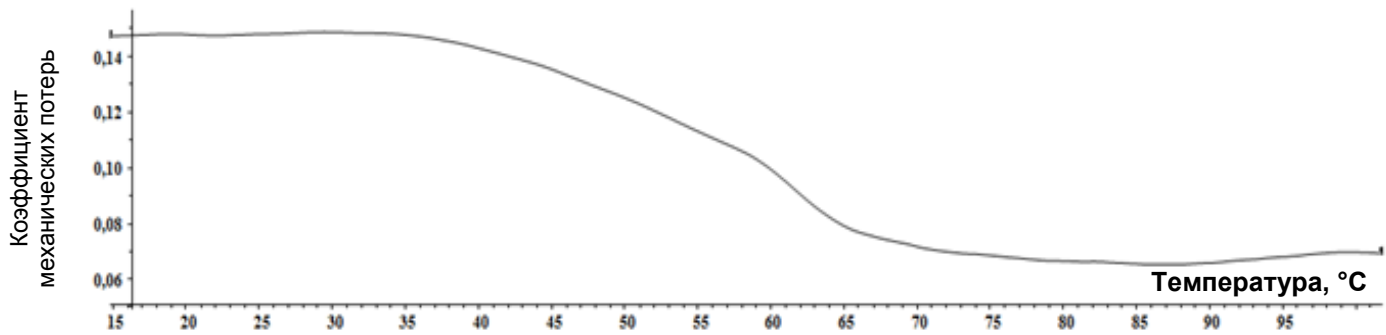
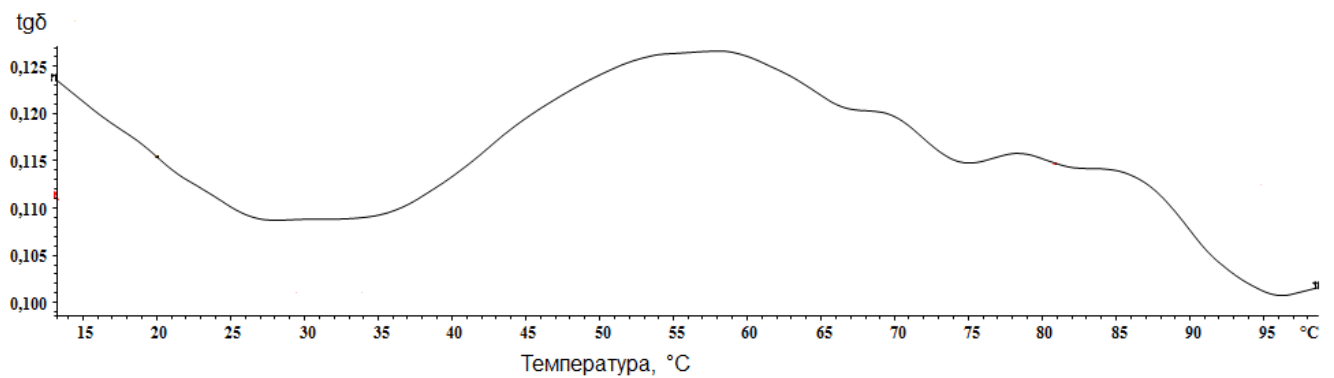
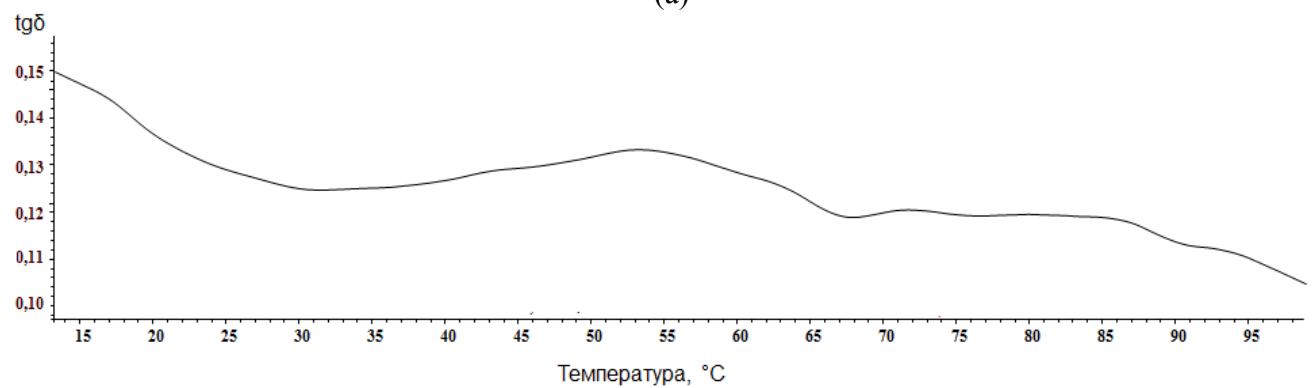


Рисунок 6. Температурная зависимость КМП ВПП на основе ТПУ толщиной 2,0 мм с армирующим слоем из металла (толщиной 0,5 мм).



(а)



(б)

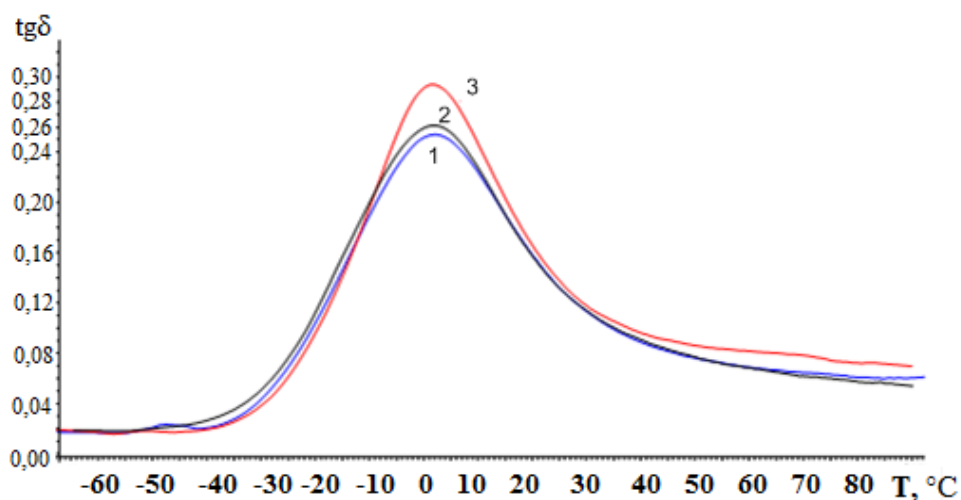
Рисунок 7. Температурная зависимость КМП ВПП с композиционным армирующим слоем на основе углеродной ткани с углом выкладки наполнителя 0° (а) и 90° (б).

Из представленных в таблице 2 и на рисунках 5 и 6 данных следует, что $\text{tg}\delta$ образцов ВПМ со слоем из алюминиевого сплава больше, чем у образцов ВПП без армирующего слоя как при нормальной ($\text{tg}\delta=0,15$ и $0,07$ соответственно), так и при повышенной температурах ($\text{tg}\delta=0,07$ и $0,02$ соответственно). Таким образом, *армированные вибропоглощающие материалы по демпфирующим свойствам являются более эффективными по сравнению с однослойными вибропоглощающими покрытиями*. Этот эффект объясняется тем, что в процессе вибрации в вибропоглощающих покрытиях реализуются деформации растяжения-сжатия, и за счет этого происходит рассеяние вибрационной энергии. В случае деформирования ВПМ, имеющих «ограничивающий» армирующий слой, эффект диссипации энергии усиливается за счет возникновения в вязкоупругом полимерном слое сдвиговых деформаций помимо деформаций растяжения-сжатия. Однако стоит учитывать, что наличие армирующего слоя приводит к возрастанию поверхностной плотности АВПМ и, следовательно, массовым затратам.

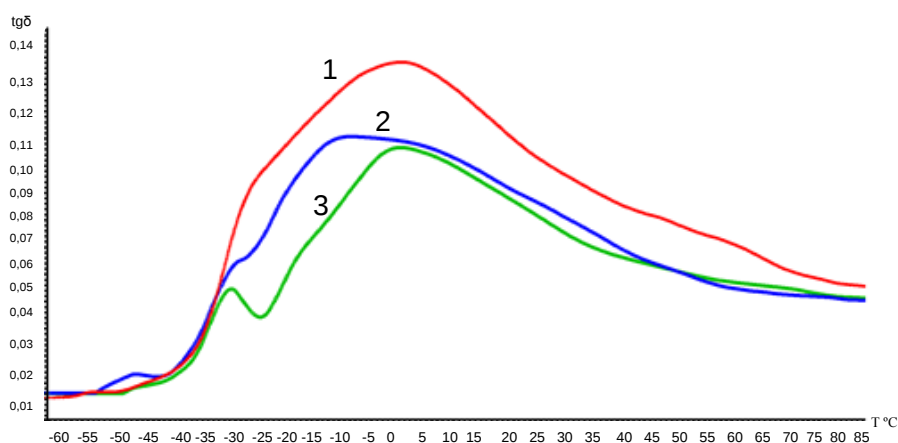
Влияние направления выкладки наполнителя армирующего слоя на КМП АВПМ с композиционными армирующими слоями показано на рисунке 7 и в таблице 2, откуда следует, что наибольшие значения $\text{tg}\delta$ соответствуют углу выкладки 90° . *Из анализа представленных данных, следует, что наличие армирующего слоя и его природа оказывают влияние на демпфирующие свойства АВПМ. На величину КМП ВПМ с композиционным армирующим слоем оказывает влияние его состав - природа наполнителя и направление выкладки композиционного армирующего слоя, причем наибольшие значения $\text{tg}\delta$ соответствуют углу выкладки 90° .*

Для обеспечения работоспособности АВПМ требуется необходимый уровень адгезии между слоями для сохранения монолитности материала и исключения его расслоения. Раздел 3.3 главы 3 посвящен технологии соединения армирующего и вибропоглощающих слоев АВПМ между собой и сравнительному анализу прессового и клеевого способов изготовления. Установлено, что АВПМ типа «сэндвич», изготовленные способом склеивания, в среднем имеют привес по массе ($0,2-0,3$) кг по сравнению с отпрессованными, а прессовой способ соединения слоев превосходит клеевой по величине межслойной адгезии образцов ВПМ. *Таким образом, прессовой способ изготовления слоистых ВПМ является более предпочтительным по сравнению со склеиванием. Однако применение вибропоглощающих материалов в конструкции изделий проводится путем склеивания их с вибрирующими поверхностями.*

Исследовано влияние клеевых соединений, полученных с применением клеев на основе полиуретанового (ВКР-24 $T_g = -31 \dots -25^\circ\text{C}$) и силоксанового каучуков (ВКР-86 $T_g = -48 \dots -44^\circ\text{C}$) различной толщины на КМП двухслойного АВПМ (состоящего из слоя ТПУ и листа алюминиевого сплава), приклеенного на подложку из сплава Д-16АТ толщиной 1,0 мм, моделирующую вибрирующую поверхность. Результаты испытаний показаны на рисунке 8.



(а)



(б)

Рисунок 8. Температурная зависимость КМП двухслойного АВПМ на металлической подложке при частоте 100 Гц с различным числом слоев клея ВКР-24 (а) и ВКР-86 (б): 1 – один слой клея; 2 – два слоя клея; 3 – три слоя клея.

Из рис. 8 (а) видно, что образцы с клеем ВКР-24 имеют узкий температурный интервал эффективного вибропоглощения с высокими значениями $\text{tg}\delta$, тогда как для образцов с клеем ВКР-86 наблюдается его расширение с одновременным снижением значений коэффициента механических потерь. Полученный эффект можно объяснить тем, что клей ВКР-24 и базовый материал вибропоглощающего слоя - ТПУ имеют близкие температурные области стеклования, в то время как T_g многокомпонентного клея ВКР-86 находится в температурной области почти на 20 °С ниже. Из представленных на рисунке 8 данных также следует, что толщина клеевой прослойки каждого исследованного клея оказывает влияние на демпфирующие свойства образцов АВПМ на металлической подложке: с увеличением количества слоев клея ВКР-24 от одного до трех в области температур выше 0 °С величина КМП возрастает и напротив - большему числу

слоев клея ВКР-86 соответствуют меньшие значения $\text{tg}\delta$. *Таким образом, наличие клеевых слоев и их количество оказывают влияние на поверхностную плотность, межслойную адгезию и вибропоглощающие свойства слоистого ВПМ: при выборе клея для соединения вибропоглощающего материала с вибрирующей поверхностью необходимо не только учитывать его эксплуатационные характеристики (рабочую температуру, адгезию к соединяемым поверхностям), но и термодинамические свойства.*

Анализ результатов исследований позволяет сформулировать основные принципы разработки слоистых ВПМ - регулирование физических, демпфирующих и механических свойств слоистых армированных ВПМ осуществляется путем изменения: природы, толщины вибропоглощающих слоев, а также их сочетания с различными армирующими слоями; расположения армирующих и вибропоглощающих слоев; наполнителя композиционного армирующего слоя и направления его выкладки; способа соединения армирующих и вибропоглощающих слоев. Выявленные закономерности использованы при разработке термостойкого ВПМ марки ВТП-3В и ПКМ марки ВТП-1-ВД с интегрированным вибропоглощающим слоем.

Результаты исследования горючести, физических и механических свойств экспериментальных образцов термостойкого слоистого ВПМ представлены в таблице 3, из которой следует, что толщина слоистых материалов не всегда складывается из толщин составных слоев, прочность связи между слоями нетканого полотна и фторопластовой пленки выше прочности самих полотен, поэтому при испытании происходило их расслаивание за исключением материала из волокна Арселон. Таким образом, реализуется принцип регулирования физических свойств слоистых ВПМ в зависимости от природы и свойств их исходных слоев и технологии изготовления.

Таблица 3 - Физические, механические свойства и горючесть экспериментальных образцов термостойкого слоистого ВПМ

Состав образцов	Толщина слоев/ слоистого ВПМ, мм		$P, \text{кг/м}^2$	Категория горючести	$\sigma_{\text{рассл}}, \text{Н/мм}$ при расслаивании от	
					ткани СВМ	нетканого полотна
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ АОМ	0,50 0,05 2,00	0,9	0,75	Трудно-сгорающий	1,16	0,11 расслаивание нетканого полотна
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ НТМ-А	0,25 0,05 4,00	1,0	0,60	Трудно-сгорающий	0,12	<0,04 расслаивание нетканого полотна
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон	0,50 0,05 2,00	1,2	0,92	Самозатухающий	1,90	2,00 разрыв пленки

В таблице 4 приведены вибропоглощающие свойства наиболее перспективных составов термостойкого слоистого ВПМ. Из представленных данных следует, что наибольшие значения

демпфирующих свойств при частоте 1000 Гц и температурах до 180 °С имеют образцы на основе ткани СВМ арт. 86-130 и нетканого полотна Арселон.

Результаты исследования влияния поверхностной плотности исходных слоев на диссипативные свойства термостойкого ВПМ (таблица 5) показали, что с увеличением поверхностной плотности арамидной ткани и нетканого полотна диссипативные свойства возрастают почти в 2 раза, а увеличение поверхностной плотности фторопластовой пленки напротив приводит к их снижению.

Таблица 4 – Вибропоглощающие свойства экспериментальных образцов термостойкого слоистого ВПМ при частоте 1000 Гц

Состав образца	tgδ при			E', МПа	E'', МПа
	-60°С	20 °С	180 °С		
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон	0,20	0,18	0,13	104,70	18,80
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки АОМ	0,13	0,21	0,12	96,30	20,20

Можно предположить, что в данном случае полимерный пленочный слой выступает в роли термопластичного связующего, обеспечивающего монолитность слоистого материала, а не является самостоятельным вибропоглощающим слоем, особенно при такой незначительной толщине. Диссипация вибрационной энергии в данном случае обеспечивается волокнистой структурой слоев материала и происходит за счет трения волокон между собой.

Таблица 5 - Диссипативные свойства экспериментальных образцов термостойкого слоистого ВПМ в зависимости от поверхностной плотности материалов его составных слоев

Поверхностная плотность, г/м ²			tgδ при 1000 Гц и T=20 °С	E' при 1000 Гц и T=20 °С
aramидная ткань	нетканое полотно	фтороплас- товая пленка		
165	420	220	0,10	70,4
350	420	220	0,20	150,0
350	290	220	0,09	58,9
350	420	440	0,10	75,5

Экспериментальные образцы термостойкого слоистого ВПМ были изготовлены способом прямого контактного прессования. Показателем их качества являлась прочность связи между слоями ($\sigma_{\text{рассл}}$). Результаты исследования влияния технологических параметров прессования (температура, давление) на прочность связи приведены на рисунке 9, из которого следует, что прочность связи между слоями увеличивается с ростом температуры прессования до

300 °С и в дальнейшем не изменяется, при этом зависимость $\sigma_{\text{рассл.}}$ от давления носит ступенчатый характер и приводит к снижению указанного показателя только при возрастании $P_{\text{уд.}}$

В результате выполненных работ разработан материал листовой вибропоглощающий марки ВТП-3В и технология его изготовления.

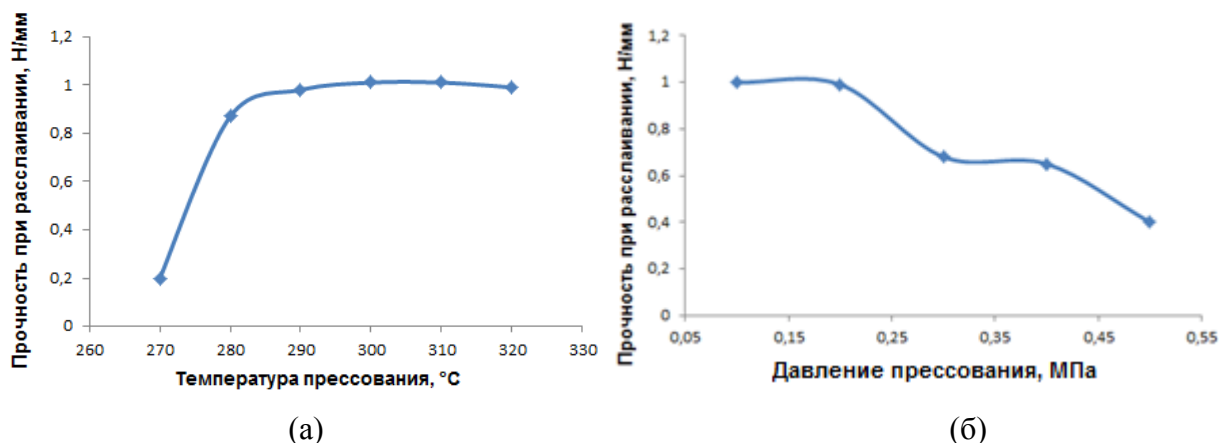


Рисунок 9. Влияние температуры (а) и давления (б) прессования на прочность при расслаивании вибропоглощающего материала.

ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем представляет собой материал типа «сэндвич», состоящий из центрального внутреннего вибропоглощающего слоя с симметрично расположенными относительно него обшивками из армирующих (конструкционных) слоев (таблица 6). Ранее было установлено, что симметричное размещение армирующих слоев относительно центрального вибропоглощающего является наиболее эффективным. Для обеспечения массовой эффективности поверхностная плотность результирующего материала не должна превышать 5 кг/м².

Таблица 6 – Состав экспериментальных образцов ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем

№ варианта состава	Состав конструктивных слоев связующее /наполнитель	Внутренний вибропоглощающий слой	Количество конструктивных слоев	Толщина образца, мм
1	ВК-51/Т-10	Пленка на основе ТПУ	8	2,76
2	ВК-51/Т-60		10	2,77
3	ВК-51/Т-10	Пленка на основе ПВА	10	3,00
4	ВК-51/Т-60		16	2,30
5	ВСК 14-6/Т-10	Пленка на основе ТПУ	12	3,23
6	ВСК 14-6/Т-60		14	2,75
7	ВСК 14-6/Т-64		20	2,50
8	ВСК-14-6/Т-15		14	2,63
9	ВСК 14-6/Т-10	Пленка на основе ПВА	12	3,40
10	ВСК 14-6/Т-60		14	2,80
11	ВСК 14-6/Т-64		20	2,55
12	ВСК-14-6/Т-15		14	2,92

Из представленных в таблице 7 результатов исследования влияния различных способов изготовления на основные свойства ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем следует, что наиболее высокие значения прочности при изгибе имеют образцы материала, изготовленные способом прессования. Значительно уступают им образцы ПКМ, изготовленные вакуумным формованием. При этом из таблицы 7 видно, что экспериментальные образцы ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем имеют примерно одинаковые демпфирующие свойства при частоте 100 Гц в исследованном диапазоне температур, а максимум их вибропоглощения соответствует температурной области 0...20 °С. **Таким образом, способы изготовления ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем в основном оказывают влияние на механические свойства слоистого материала.**

Результаты определения комплекса свойств изготовленных экспериментальных образцов приведены в таблицах 8-9 и на рисунке 10.

Таблица 7 – Вибропоглощающие и механические свойства образцов ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем в зависимости от способа изготовления

Способ изготовления	Коэффициент механических потерь при температуре испытаний, °С						Прочность при изгибе ($\sigma_{изг.}$) при 20 °С, МПа
	-60	-20	0	+20	+40	+80	
Автоклавное формование	0,05	0,05	0,13	0,16	0,11	0,06	$\frac{406}{400-410}$
Прессование	0,05	0,06	0,13	0,14	0,10	0,10	$\frac{480}{465-485}$
Вакуумное формование	0,06	0,06	0,16	0,13	0,08	0,06	$\frac{260}{250-270}$

Таблица 8 - Результаты исследования основных свойств образцов ПКМ на основе конструкционных слоев со связующим из клеевой пленки ВК-51

Свойство	Состав образцов, номер варианта состава			
	ВК-51/Т-10	ВК-51/Т-60	ВК-51/Т-10	ВК-51/Т-60
	Внутренний вибропоглощающий слой			
	Пленка на основе ТПУ		Пленка на основе ПВА	
	вариант 1	вариант 2	вариант 3	вариант 4
Поверхностная плотность, кг/м ²	4,730	4,680	4,650	3,690
Влагопоглощение за 24 ч., %	0,16	0,17	0,18	0,19
Прочность при изгибе, МПа	350	440	190	160
Прочность связи между слоями, Н/мм	6,3	6,8	5,5	5,8
Горючесть (в течение 60 с)	сгорающий			

По результатам неразрушающего контроля, проведенного перед началом исследований механических характеристик образцов, установлено, что дефекты в образцах отсутствуют. Прочность при изгибе образцов ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и Т-60, не содержащих внутренний вибропоглощающий слой, составляет 570 и 630 МПа соответственно. Внедрение вибропоглощающего слоя во внутреннюю структуру слоистого пластика приводит к изменению его механических характеристик, прежде всего по причине уменьшения степени наполнения ПКМ.

Таблица 9 - Результаты исследования основных свойств образцов ПКМ на основе конструкционных слоев со связующим ВСК-14-6

Свойство	Армирующий наполнитель конструкционных слоев							
	Т-10		Т-60		Т-64		Т-15	
	Внутренний вибропоглощающий слой							
	ТПУ	ПВА	ТПУ	ПВА	ТПУ	ПВА	ТПУ	ПВА
	вариант 5	вариант 9	вариант 6	вариант 10	вариант 7	вариант 11	вариант 8	вариант 12
Поверхностная плотность, кг/м ²	5,900	6,400	5,000	5,500	4,350	4,200	4,300	4,550
Влагопоглощение за 24 ч., %	0,08	0,13	0,10	0,12	0,10	0,19	0,08	0,21
Прочность при изгибе, МПа	220	150	470	255	350	120	250	110
Прочность связи между слоями*, Н/мм	5,8	0,1	7,1	11,1	7,2	8,3	4,6	5,7
Горючесть (в течение 60 с)	самозатухающий	трудногорающий	самозатухающий	трудногорающий	сгорающий	трудногорающий	сгорающий	трудногорающий

*разрушение происходит по когезионному механизму

При этом из результатов исследований прочности при изгибе следует, что также состав внутреннего вибропоглощающего слоя оказывает значительное влияние на механические свойства всех исследованных экспериментальных образцов. Образцы, содержащие интегрированную пленку на основе модифицированного ПВА, по величине прочности при изгибе уступают аналогам с ТПУ почти в 2-3 раза в зависимости от марки используемой стеклоткани, но независимо от вида используемого связующего.

Соответствующие ПКМ, не содержащие внутренний вибропоглощающий слой, имеют $\text{tg}\delta=0,013-0,017$ при частоте 100 Гц в диапазоне температур от -60 до 80 °С. При исследовании частотной зависимости КМП при 20 °С вариантов состава №№ 5-12 установлено, что образцы с внутренним слоем из ПВА пленки имеют наиболее высокие значения демпфирующих свойств (таблица 10). Из результата анализа указанного выше комплекса свойств, следует, что наилучшим их сочетанием обладает вариант состава №6.

Как видно из рисунка 10, максимум вибропоглощения образцов ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем различных вариантов состава определяется природой внедренного слоя.

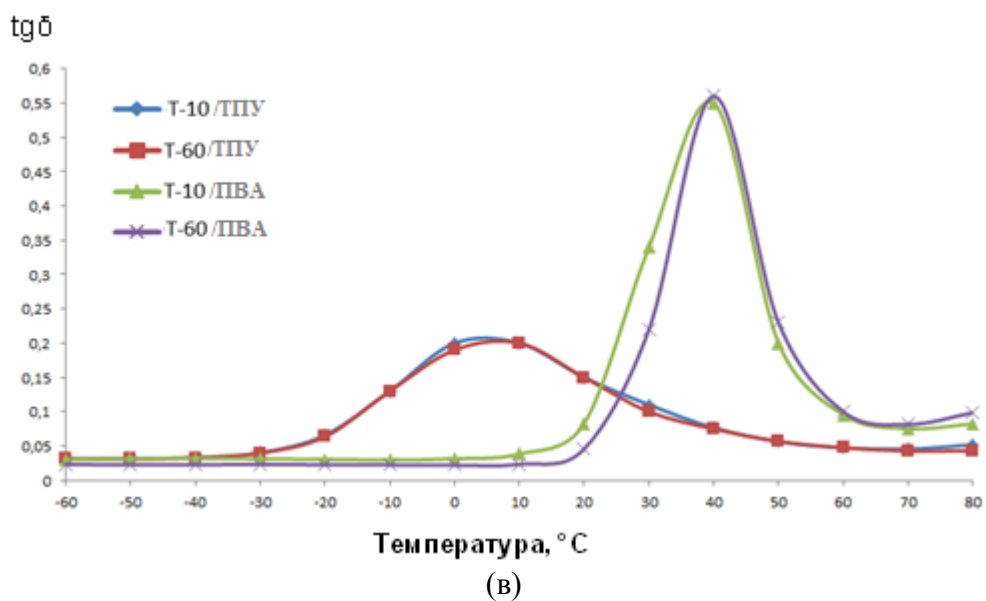
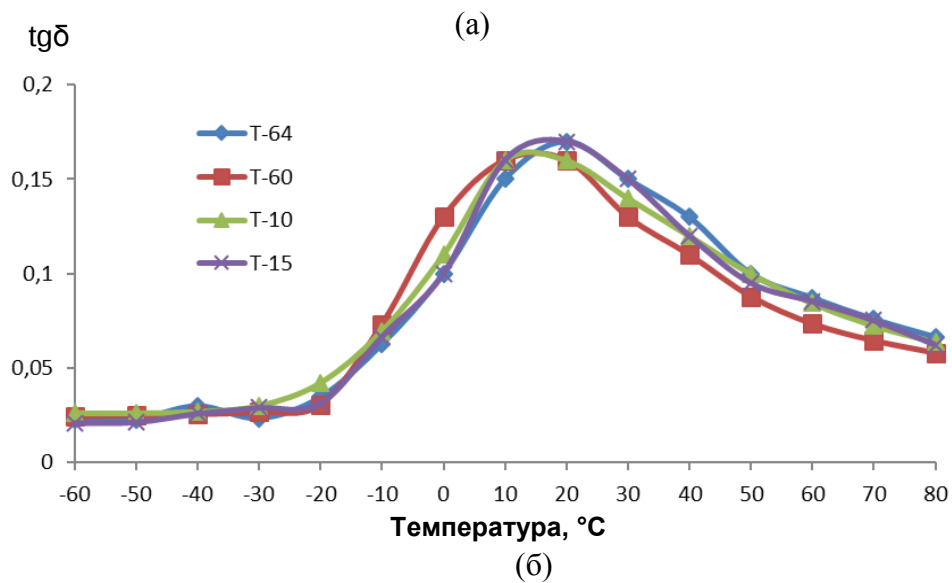
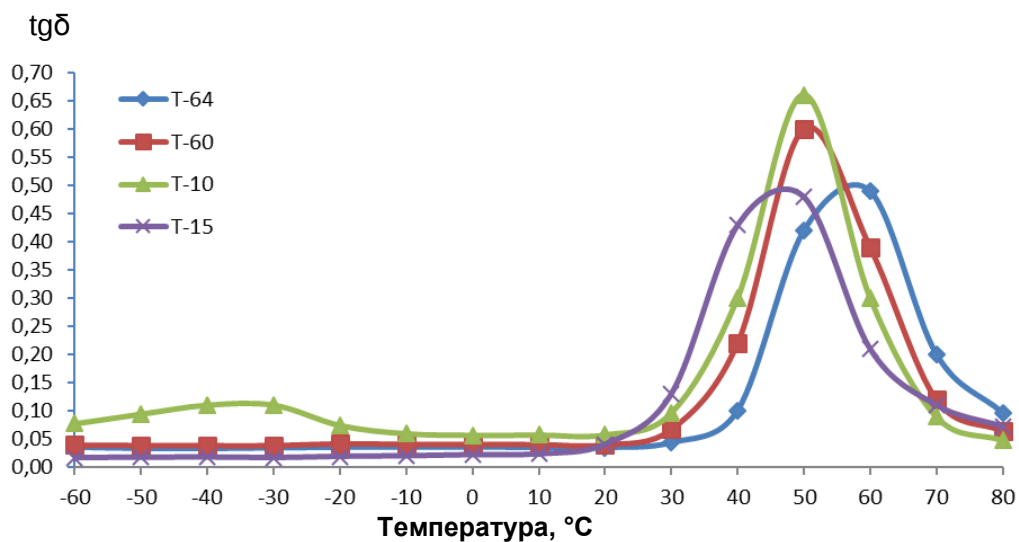


Рисунок 10. Температурная зависимость КМП образцов ПКМ различного состава: на основе связующего ВСК-14-6 с интегрированным вибропоглощающим слоем из ПВА (а) и ТПУ (б), на основе конструкционных слоев из стеклотканей Т-10 и Т-60 и связующего из клеевой пленки ВК-51 с интегрированным вибропоглощающим слоем на основе ТПУ и ПВА (в).

Таблица 10 - КМП образцов ПКМ на основе конструкционных слоев со связующим ВСК-14-6 и интегрированным вибропоглощающим слоем из ТПУ и ПВА

Частота, Гц	Состав образцов, номер варианта состава							
	ВСК-14-6/ Т-10		ВСК-14-6/ Т-60		ВСК-14-6/ Т-64		ВСК-14-6/ Т-15	
	Внутренний вибропоглощающий слой							
	ТПУ	ПВА	ТПУ	ПВА	ТПУ	ПВА	ТПУ	ПВА
	вар. 5	вар. 9	вар. 6	вар. 10	вар. 7	вар. 11	вар.8	вар. 12
100	0,10	0,61	0,15	0,62	0,15	0,54	0,10	0,61
300	0,12	0,54	0,10	0,50	0,12	0,36	0,11	0,48
500	0,05	0,32	0,05	0,30	0,05	0,08	0,05	0,21

При этом вид связующего и структура армирующего наполнителя конструкционных слоев не оказывают значительного влияния на вибропоглощающие свойства материала в целом. Из представленных на рисунке 10 данных также следует, что образцы ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем из ПВА пленки по демпфирующим свойствам и, в особенности, по значению экстремума $\text{tg}\delta_{\text{max}}$ значительно превосходят аналогичные образцы с ТПУ. Таким образом, экспериментальным путем показано, что внедрение вибропоглощающего слоя во внутреннюю структуру слоистого пластика приводит к значительному повышению его вибропоглощающих свойств.

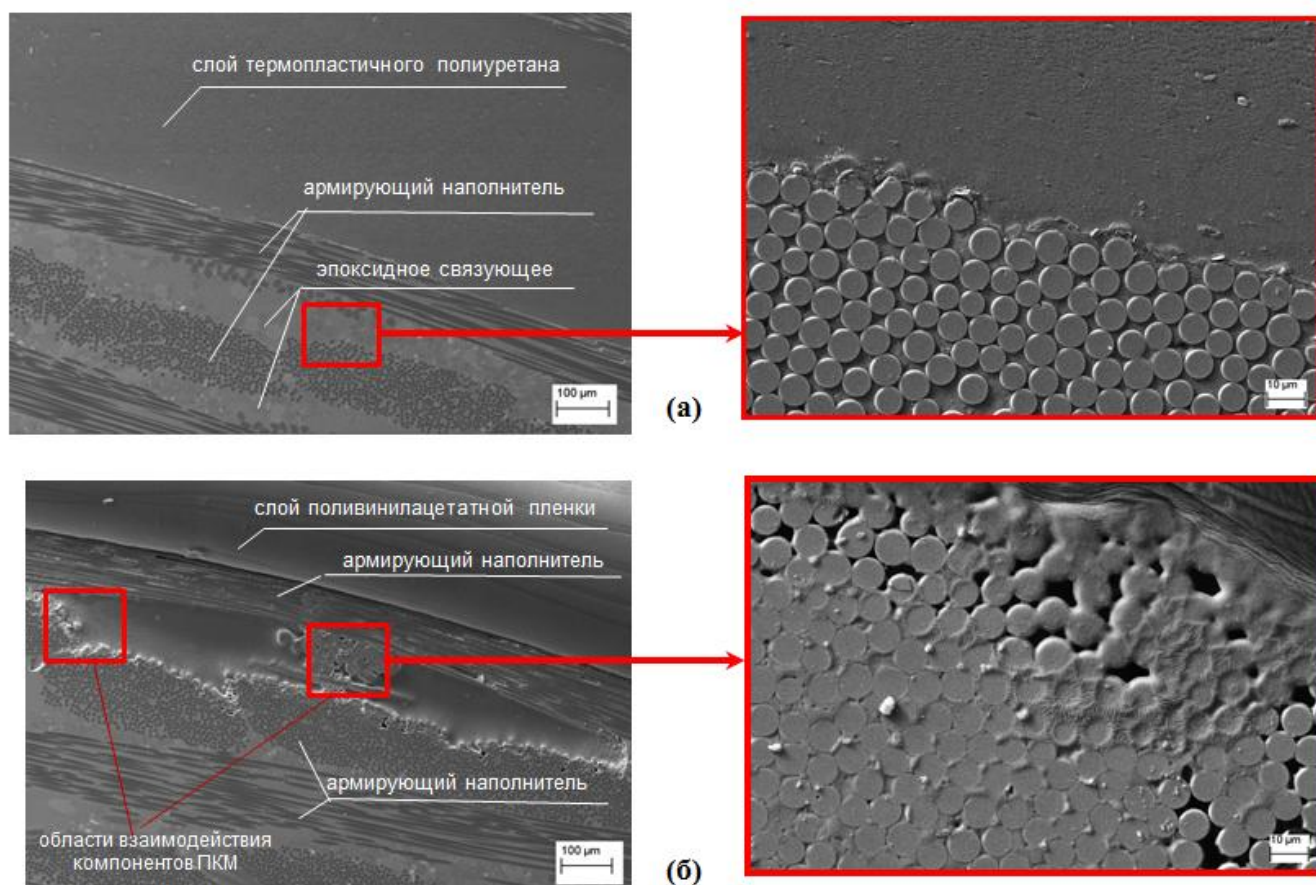


Рисунок 11. Микрофотографии срезов образцов слоистых пластиков с внутренним вибропоглощающим слоем на основе ТПУ (а) и ПВА (б).

Для исследования причин изменения прочности при изгибе ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем были проведены дополнительные исследования образцов ПКМ на основе стеклоткани Т-60 с внутренними вибропоглощающими слоями на основе ПВА и ТПУ. Предположительно, на изменение прочностных показателей также влияет механизм взаимодействия эпоксидного связующего и вибропоглощающего слоя, а усиление негативных эффектов взаимодействия слоев в ПКМ может быть вызвано следующими факторами: взаимной диффузией компонентов связующего, входящих в конструкционные слои ПКМ, и материала вибропоглощающего слоя, их химическим взаимодействием или слабой адгезией между компонентами ПКМ и вибропоглощающими слоями. Для объяснения механизма взаимодействия компонентов слоистого материала исследована микроструктура композита на границе раздела фаз вибропоглощающего и конструкционных слоев (рисунок 11).

На изображениях 11 (а) видна четкая граница между фазами конструкционных слоев и термопластичного полиуретана, в то время как на изображениях 11 (б) прослеживается миграция материала вибропоглощающего слоя в структуру конструкционных слоев. В случае использования вибропоглощающего слоя из ПВА на границе раздела фаз наблюдаются образования по типу «кратеров» и прочие продукты взаимодействия. Представленные микрофотографии подтверждают предположения об активных диффузионном и реакционном взаимодействиях между материалами связующего и вибропоглощающего слоя на основе ПВА. В то же время граница раздела фаз полиуретанового и эпоксидного слоя схожа с клеевым соединением - реализуется адгезионное взаимодействие.

В результате выполненных работ разработаны состав и технология изготовления ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВТП-1ВД.

Выводы

1. Сформулированы общие принципы разработки слоистых армированных вибропоглощающих материалов на основе термоэластопластов и органических волокон, в соответствии с которыми выбраны структура, толщины, поверхностная плотность и сочетания компонентов исходных материалов слоев в зависимости от их химической природы, для обеспечения оптимального соотношения показателей коэффициента механических потерь и прочности при изгибе для разработки ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем, а также для разработки слоистого вибропоглощающего материала с повышенными диссипативными свойствами и рабочей температурой до 180 °С.
2. Показано, что температурный диапазон максимального вибропоглощения ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем определяется природой внутреннего вибропоглощающего слоя и зависит от его температуры стеклования (находится ~ на 10-20 °С выше нее).

3. На основе установленных закономерностей впервые разработан полимерный композиционный материал с интегрированным вибропоглощающим слоем с повышенными вибропоглощающими свойствами ($\text{tg}\delta=0,12$ при частоте 100 Гц и температуре 20 °С), которому присвоена марка ВТП-1ВД.
4. Внедрение вибропоглощающего слоя во внутреннюю структуру ПКМ приводит к значительному росту его вибропоглощающих свойств (не менее чем на 2 порядка).
5. Показано, что уровень прочностных свойств ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем определяется механизмом взаимодействия между компонентами конструкционных и функционального слоев.
6. Исследовано влияние технологических параметров прессования (температура, давление) на прочность связи между слоями термостойкого слоистого вибропоглощающего материала и определены оптимальные технологические параметры, позволившие изготавливать ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем за единый технологический цикл.
7. Проведена оценка поверхностной плотности (массы 1 м²), коэффициента механических потерь и динамического модуля упругости, пожаробезопасных свойств, прочности связи между слоями слоистых вибропоглощающих материалов в зависимости от структуры, химической природы и поверхностной плотности исходных материалов слоев, позволившая выбрать состав ВПМ с учетом полученных закономерностей.
8. Разработан слоистый вибропоглощающий материал с повышенной до 180 °С рабочей температурой, которому присвоена марка ВТП-3В, и технология его изготовления.
9. По результатам работ выпущено: на материал марки ВТП-3В – 1 ТР, 1 ТУ и 2 изменения к ТР, 2 изменения к ТУ; на материал марки ВТП-1ВД – 1 ТР и 1 изменение к ТР.
10. Оригинальность и новизна проведенных научных исследований подтверждена получением патента РФ 2687938 опубл. 16.05.2019.

**Список основных трудов по теме диссертации, опубликованный
в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. Сорокин А.Е., Сагомонова В.А., Петрова А.П., Соловьянчик Л.В. Технологии получения ПКМ на основе термопластичной матрицы (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2021. №3. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-3-78-86.
2. Сагомонова В.А., Долгополов С.С., Целикин В.В., Сорокин А.Е. Исследование влияния интегрированного вибропоглощающего слоя на свойства композитных трехслойных звуко теплоизолирующих сэндвич-панелей // Труды ВИАМ. 2020. № 9 (91). С. 87-95. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-87-95.

3. Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Тюменева Т.Ю., Большаков В.А. Влияние состава вибропоглощающих материалов на коэффициент механических потерь // Труды ВИАМ. 2015. № 10. С. 10. DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-10-10.
4. Сагомонова В.А., Сытый Ю.В., Кислякова В.И., Долгополов С.С. Исследование демпфирующих свойств вибропоглощающих материалов на основе термоэластопластов // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S3. С. 5-10. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s3-5-10.
5. Сагомонова В.А., Сытый Ю.В. Основные принципы создания вибропоглощающих материалов авиационного назначения // Труды ВИАМ. 2013. № 11. С. 3.
6. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А. Вибропоглощающие материалы на основе термоэластопластов // Труды ВИАМ. 2013. № 3. С. 6.
7. Сытый Ю.В., Кислякова В.И., Сагомонова В.А., Антюфеева Н.В. Перспективный вибропоглощающий материал ВТП-3В // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 3 (24). С. 47.
8. Сытый Ю.В., Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Большаков В.А. Новые вибропоглощающие материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 2 (23). С. 51-54.

**Список основных трудов по теме диссертации, опубликованный
в рецензируемых изданиях:**

9. E.N. Kablov, V.A. Sagomonova, A.E. Sorokin, V.V. Tselikin, A.I. Gulyaev A Study of the Structure and Properties of Polymer Composite Materials with Integrated Vibration Absorbing Layer // Polymer Science, Series D. 2020. №13 (3). p.335-340. DOI: 10.1134/S1995421220030090.
10. V.A. Sagomonova, V.I. Kislyakova, V.A. Bolshakov, S.S. Dolgoplov Effect of Reinforcing Layer on the Mechanical Loss Tangent of Vibration-Absorbing Materials // International Polymer Science and Technology. 2016. №43(6). p.13-16. DOI: 10.1177/0307174X1604300606.
11. Сагомонова В.А., Кислякова В.И., Тюменева Т.Ю., Большаков В.А. Влияние клеевого слоя на демпфирующие свойства вибропоглощающего материала на основе термопластичного полиуретана // Клеи. Герметики. Технологии. 2015. № 2. С. 8-11.
12. Каблов Е.Н., Сагомонова В.А., Целикин В.В., Долгополов С.С., Сорокин А.Е. // Патент РФ 2687938 «Полимерный композиционный материал с интегрированным вибропоглощающим слоем» опубл. 16.05.2019.

Отпечатан экз.

Исп. Сагомонова В.А.

Печ. Сагомонова В.А.

Автореферат Сагомонова В.А.

«Слоистые вибропоглощающие материалы на основе термоэластопластов и органических волокон и технология их изготовления»

Формат бумаги 60×90/16. Печ. л 1,00. Тираж экз.

Отпечатано в типографии ФГУП «ВИАМ»

105005, г. Москва, ул. Радио, 17