

Федеральное государственное унитарное предприятие
**«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ»**

Государственный научный центр Российской Федерации

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
профессор
Петрова Алефтина Петровна

Москва 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР	12
1.1 Диссипация энергии в материалах.....	12
1.2 Способы создания вибропоглощающих материалов.....	13
1.2.1 Структурно-химическое модифицирование полимеров.....	13
1.2.2 Использование наполнителей для повышения вибропоглощающих свойств полимеров.....	16
1.3 Шум в кабине и салоне самолета.....	17
1.4 Вибропоглощающие покрытия для применения в авиационной технике.....	21
1.5 Армированные вибропоглощающие материалы.....	25
1.6 ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами.....	29
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	39
2.1 Объекты исследований.....	35
2.2. Методы исследований.....	49
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	56
3.1. Выбор вибропоглощающего слоя.....	56
3.1.1 Исследование свойств полимерных пленок для создания вибропоглощающего слоя.....	56
3.1.2 Влияние вибропоглощающих свойств слоев на коэффициент механических потерь слоистого ВПМ.....	59
3.1.3 Влияние УНТ на свойства вибропоглощающего слоя на основе термопластичного полиуретана	64
3.2 Выбор армирующего слоя.....	67
3.2.1 Металлический армирующий слой.....	67
3.2.2 Композиционный армирующий слой.....	73
3.2.3 Сравнительная характеристика влияния металлического и композиционного армирующих слоев на комплекс свойств АВПМ.....	75
3.3 Технология соединения слоев армированного ВПМ между собой.....	80
3.4 Выбор структуры АВПМ.....	91
3.4.1 Влияние структуры слоистого АВПМ на его свойства.....	91

3.4.2 Влияние перфорации армирующего и вибропоглощающего слоев на технологические параметры изготовления АВПМ и его свойства.....	94
3.4.3 Влияние количества слоев на вибропоглощающие свойства многослойного АВПМ.....	98
3.5 Термостойкий слоистый вибропоглощающий материал и исследование его свойств.....	101
3.5.1 Исследование влияния состава слоев на свойства слоистого термостойкого вибропоглощающего материала.....	101
3.5.2 Влияние технологических параметров режима прессования на прочность связи между слоями термостойкого вибропоглощающего материала.....	107
3.5.3 Влияние типа клея на прочность клеевых соединений слоистого термостойкого вибропоглощающего материала с металлом.....	109
3.6 ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами.....	110
3.6.1 Экспериментальные исследования по разработке ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем.....	111
3.6.2 Разработка ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем.....	117
3.6.3 Исследование причин снижения прочностных характеристик ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем.....	127
3.6.4 Трехслойная сотовая конструкция с внутренним вибропоглощающим слоем.....	130
3.7 Влияние адгезионного слоя на свойства конструкции, включающей АВПМ и подложку из металла или ПКМ.....	137
3.8 Комплекс свойств разработанных материалов марок ВТП-3В и ВТП-1ВД в исходном состоянии.....	140
3.9 Практическая реализация результатов работы.....	144
ВЫВОДЫ.....	149
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВПМ	– вибропоглощающий материал
АВПМ	– армированный вибропоглощающий материал
ВПП	– вибропоглощающее покрытие
ПКМ	– полимерный композиционный материал
АС	– армирующий слой
ВПС	– вибропоглощающий слой
ТПУ	– термопластичный полиуретан
ПУ	– полиуретан
ПВА	– поливинилацетат
ЭА	– этилацетат
УНТ	– углеродные нанотрубки
ДМА	– динамический механический анализ
ДСК	– дифференциальная сканирующая калориметрия
ТГА	– термогравиметрический анализ
$\operatorname{tg} \delta$	– тангенс угла механических потерь
КМП	– коэффициент механических потерь
E'	– динамический модуль упругости
E''	– динамический модуль упругости
T_g	– температура стеклования
$T_{\text{пр.}}$	– температура прессования
$P_{\text{уд.}}$	– удельное давление прессования
$\tau_{\text{пр.}}$	– время прессования
$\tau_{\text{ост.}}$	– остаточное время горения
$h_{\text{прог.}}$	– высота прогорания образца
P	– поверхностная плотность (масса 1 м^2)
$\sigma_{\text{отсл.}}$	– прочность при отслаивании
$\sigma_{\text{рассл.}}$	– прочность связи между слоями (межслойная адгезия)
$\sigma_{\text{изг.}}$	– прочность при изгибе
σ_p	– прочность при разрыве
ϵ_p	– относительное удлинение при разрыве
λ	– теплопроводность
арт.	– артикул
НД	– нормативная документация
ЦАГИ	– центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы:

Развитие техники, связанное с увеличением скоростей и мощностей машин и механизмов, привело к значительному возрастанию вредных шумов и вибраций, ухудшающих акустическую комфортность и понижающих надежность работы механизмов. Особенно актуальна данная проблема для авиационной отрасли.

Звуковое поле внутри кабины и салона самолета обусловлено многими источниками, относительный вклад которых может меняться в зависимости от типа и класса самолета, режима полета и совершенства систем внутреннего оборудования.

Внешние (выхлопная струя, компрессор, пограничный слой) и внутренние (силовая установка, система кондиционирования воздуха) источники шума, воздействуя на конструкции самолета, возбуждают колебания обшивки фюзеляжа, которые передаются в кабину и салон самолета в виде звуковых колебаний. Наиболее острыми являются проблемы защиты от структурного шума и вибрации в низкочастотном диапазоне, где наблюдаются резонансные колебания конструкций.

Стандарты по ограничению шума в самолетах преследуют цель создания благоприятных с точки зрения санитарных требований акустических условий для пассажиров и экипажа. Основными отрицательными факторами воздействия шума на пассажиров и экипаж самолета являются помеха речевой связи, а также раздражающее и утомляющее действия. Кроме того, для членов экипажа, постоянно работающих в условиях сильного шума, имеется опасность повреждения слуха. Допустимые уровни шума в кабинах российских самолетов регламентированы ГОСТ 20296-2014 «Самолеты и вертолеты гражданской авиации. Допустимые уровни шума в салонах и кабинах экипажа и методы измерения шума». С развитием авиационной акустики прослеживается тенденция снижения уровня шума в салонах самолетов: так, если в 1970-ые гг. в салоне Ту-134 он составлял около 90 дБА, Ил-62 – 85 дБА, в салоне Ил-86 в 1980 г. – от 78 до 83 дБА, в салоне Ту-204 – от 75 до 83 дБА, то в настоящее время уровень шума в салоне современного самолета Сухой Суперджет составляет около 80 дБА.

Применяемые в современной авиационной технике способы борьбы с шумом можно условно разделить на активные и пассивные. Активными являются способы, при которых снижения шума добиваются путем воздействия на механизм образования шума, например, применением малошумных двухконтурных двигателей, уменьшением скорости потока в системе кондиционирования самолета, рациональной компоновкой шумящих агрегатов (в особенности силовой установки) относительно пассажирского салона. Однако, возможности

снижения шума в салоне самолета с помощью рассмотренных методов могут быть наиболее полно реализованы в том случае, если они предусмотрены на стадии проектирования.

К пассивным средствам снижения шума в кабине и салоне самолета относятся звукоизоляция и вибропоглощение. Они могут успешно применяться как на стадии проектирования, так и в процессе акустических доработок самолета, однако их применение связано с увеличением массы конструкции. Также следует отметить, что волокнистые звукоизоляционные материалы требуют облицовки, склонны к накоплению влаги и загрязнению, а также нестойки к вибрации в области низких и средних частот и в результате ее воздействия становятся хрупкими и разрушаются.

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), которые наносятся на вибрирующие поверхности, и в результате необратимого превращения вибрационной энергии в тепло при их деформировании происходит снижение амплитуды колебаний конструкции и, следовательно, уровня шума. Наиболее эффективными вибропоглощающими материалами являются полимерные материалы, обладающие способностью к диссипации внешней акустической энергии, обусловленной особенностями их молекулярного и надмолекулярного строения.

В ответ на сложившийся спрос ежегодно в мире производится, выпускается и патентуется большое количество разнообразных вибропоглощающих материалов, которые могут быть условно разделены на следующие группы: однослойные и многослойные вибропоглощающие покрытия; вибропоглощающие материалы, содержащие внутренние и внешние армирующие слои; вибропоглощающие мастики и битумные материалы, а также устройства для гашения вибраций транспортных средств и механизмов. В работах отечественных ученых, современных зарубежных исследователей и технической информации производителей вибропоглощающих материалов постулируется, что армированные вибропоглощающие материалы (АВПМ) являются более эффективными в сравнении с вибропоглощающими покрытиями (ВПП), хотя в некоторых работах приводится расчетное обоснование данного явления, например, модель Росса-Кервина-Унгара. Преимуществом слоистых АВПМ также является возможность сочетать слои различного назначения, обеспечивающие помимо вибропоглощающих звукоизоляционные, звукопоглощающие, теплоизолирующие свойства, работоспособность в условиях повышенных температур (например, свыше 100 °C).

Развитие работ по созданию перспективной авиационной техники невозможно без применения полимерных композиционных материалов (ПКМ). Например, пассажирские и

транспортные самолеты имеют в общей массе конструкции свыше 50 % ПКМ, а военные - 25-30 %. Тенденция к постоянному росту применения ПКМ наблюдается и в вертолетостроении, где их средняя масса уже достигла 45-55 %. Однако, поскольку ПКМ имеют низкие вибропоглощающие свойства, существует мнение, что акустически «неблагоприятные» свойства фюзеляжа летательных аппаратов из волокнистых композитных материалов по сравнению с монолитными металлическими материалами требуют более совершенной виброакустической изоляции. Например, коэффициент механических потерь ($\text{tg}\delta$) углепластика ВКУ-39, стеклопластиков ВПС-47, ВПС-48 разработки ФГУП «ВИАМ» при 20 °С и частоте 100-1000 Гц составляет 0,001-0,01.

Традиционными подходами к повышению вибродемпфирующих характеристик ПКМ является использование связующих, обладающих повышенными вибропоглощающими свойствами, модификация полимерной матрицы за счет введения повышающих гибкость добавок, подбор схемы укладки конструктивных слоев. Однако упомянутые методы не приводят к значительному повышению вибропоглощающих свойств ПКМ и на практике оказываются малоэффективными. Применение вибропоглощающих покрытий на ПКМ существенно повышает коэффициент механических потерь конструкции из ПКМ, но приводит к увеличению ее массы, в особенности в случае использования армированных вибропоглощающих материалов (на 50-100 %). Например, благодаря применению вибропоглощающего материала марки ВТП-1В-А разработки ФГУП «ВИАМ» на поверхности стекло- и углепластиков марок ВПС-47, ВПС-48 и ВКУ-39 удалось повысить их коэффициент механических потерь до значений $\text{tg}\delta=0,08-0,13$ при $T=20$ °С и частоте 100-1000 Гц. Однако, в большинстве случаев изделия из ПКМ имеют поверхность сложной конфигурации, что также затрудняет нанесение на нее листовых вибропоглощающих покрытий и АВПМ.

Альтернативным решением данной проблемы является интегрирование вибропоглощающих слоев в структуру ПКМ. Актуальность данного направления подтверждается тем, что исследования, посвященные этой теме, спонсируются основными мировыми лидерами по производству ПКМ: Toray Industries, Cytec, Toho Tenax, DuPont-Toray Co Ltd., 3M Innovative Properties Company, Teijin, SMAC. При этом всеми исследователями констатируется снижение прочностных свойств слоистых пластиков в результате внедрения вибропоглощающего слоя в их внутреннюю структуру. Однако механизм снижения прочностных характеристик ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем практически не изучен и соответственно не освещен в научной литературе.

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.

Основные 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 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.

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 конструкционных 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. Сочетание слоев из указанных материалов обеспечило 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 и обоснованность результатов исследования:

Применение стандартизованных методов испытаний, метрологически аттестованного, поверенного современного оборудования, всесторонние исследования большого количества образцов и статистической обработкой значительного объема экспериментальных данных обеспечивают достоверность и обоснованность результатов исследования.

Личный вклад соискателя:

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. Соискателем лично проведены все исследования, разработана и составлена вся необходимая научно-техническая документация. Соискатель принимал непосредственное участие в процессах исследования материалов в ФГУП «ЦАГИ» ГНЦ РФ и внедрении разработанного материала марки ВТП-3В в конструкцию изделий АО «Компания «Сухой».

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:

Основные результаты изложены 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 объем работы:

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.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1. Диссипация энергии в материалах

Поглощение вибрации (демпфирование) – метод снижения вибраций путем усиления в конструкции процессов внутреннего трения, рассеивающих энергию в результате необратимого преобразования ее в теплоту при деформациях. Поглощение энергии в материале обусловлено следующими физическими явлениями: вязким трением, механическим гистерезисом, пластическим течением и релаксацией материала.

Вязкое, или жидкостное, трение вызвано трением частиц вещества между собой. При этом виде трения коэффициент потерь пропорционален частоте колебаний. Демпфирование, обусловленное вязким трением, наблюдается у каучукоподобных материалов и вязких жидкостей.

Механический гистерезис (внутреннее трение, или внутренние потери) связан с необратимыми изменениями микроструктуры материала. При воздействии силы на упругую среду в ней из-за неоднородности структуры происходят разрушения молекулярных цепей в полимере, кристаллов в металле, которые приводят к возникновению пластической деформации. В результате этого при периодическом процессе наблюдается отставание по фазе деформации от соответствующего напряжения.

Пластическое течение материала характерно тем, что остаточная деформация пропорциональна времени действия периодического усилия, а последнее пропорционально периоду, поэтому величина остаточной деформации растет с понижением частоты колебаний. Демпфирование, обусловленное пластическим течением материала, характерно для пластмасс и некоторых металлов.

Релаксацию материала вызывают изменения молекулярной структуры. В релаксирующей среде при постоянной деформации вызвавшее ее напряжение постепенно спадает. В результате возникает сдвиг по фазе между напряжением и деформацией и, как следствие этого, поглощение энергии.

Наиболее эффективными вибропоглощающими материалами являются полимеры, обладающие способностью к диссипации внешней акустической энергии, обусловленной особенностями их молекулярного и надмолекулярного строения. Часть энергии внешнего механического поля, затрачиваемой на колебания, полимеры рассеивают в виде тепла вследствие релаксационных явлений, происходящих в них при нагружении.

Уникальный комплекс основных физико-механических свойств полимеров, включая вибродемпфирующую способность, обусловлен их ярко выраженным вязкоупругим поведением.

Для количественной оценки демпфирующих свойств полимерных материалов используют тангенс угла механических потерь $\operatorname{tg}\delta$, коэффициент механических потерь (КМП) η , компоненты комплексного модуля упругости - динамический модуль упругости E' и модуль механических потерь E'' . Эти характеристики связаны между собой следующим соотношением [1]:

$$\operatorname{tg}\delta = \eta = E''/E' = \delta/\pi$$

Согласно классическому определению, коэффициент потерь - величина, пропорциональная отношению поглощаемой за период стационарных гармонических колебаний энергии к полной энергии системы за этот период колебаний.

Основополагающими параметрами любого полимерного вибропоглощающего материала помимо КМП является диапазон температур, соответствующих максимальному значению этой характеристики ($T_{\operatorname{tg}\delta\max}$). Известно, что коэффициент механических потерь полимеров, определяющий эффективность гашения вибраций не является константой. Он значительно зависит от температуры и частоты колебаний (проходя через максимум в определенном температурном интервале) и в меньшей мере от амплитуды [2]. Максимальные потери механической энергии ($\operatorname{tg}\delta_{\max}$) в полимерах проявляются в области перехода из стеклообразного состояния в высокоэластическое. При частотах выше 1 Гц наибольшее вибропоглощение, как правило, наблюдается выше температуры стеклования (T_g).

Особенностью вязкоупругих полимерных материалов является их способность рассеивать колебательную энергию вне зависимости от вида возбуждения: падающая звуковая волна или механическая вибрация.

Проявление вибропоглощающих свойств сетчатыми полимерами связано с сегментальной подвижностью и, прежде всего, с наличием внутреннего вращения. Возможность последнего обуславливается внутримолекулярными формами вращательных движений атомных групп около различных осей. Например, влияние на динамические механические свойства ПУ стерических эффектов боковых групп удлинителей цепи показано в работе [3].

На вибропоглощающие свойства сетчатых полимеров оказывают влияние длина поперечной сшивающей цепочки и ее податливость. Увеличение длины цепочки, а также наличие вращательных движений в ней приводит к повышению деформируемости, а, следовательно, поглощению вибрации.

1.2. Способы создания вибропоглощающих материалов

1.2.1. Структурно-химическое модифицирование полимеров

Одним из важнейших способов получения материалов с максимумом эффективности вибропоглощения в необходимой температурной области является физико-химическое модифицирование полимеров. Установлено, что неоднородность структуры полимера, полярность,

введение наполнителей, пластификаторов и других компонентов, структурирование макромолекул, например, при вулканизации каучуков или отверждении реакционноспособных олигомеров, приводит к изменению числа кинетических фрагментов, влияющих на релаксационные процессы и, следовательно, на механические потери. Основными способами модифицирования, способствующими появлению в материале разнообразных кинетических фрагментов с различным временем релаксации, являются: сополимеризация (статистическая, прививочная, блочная), структурирование, компаундирование или механическое смешение полимерных компонентов [4].

В работе [5] установлена связь между демпфирующими свойствами различных полимеров и их T_g , которая в свою очередь зависит от множества параметров химического состава. Показано, что максимум вибропоглощения можно регулировать посредством изменения химического состава, а также, что высокому пику механических потерь соответствует узкая частотная область, а низкому – напротив широкий интервал частот. Проблема получения материалов, у которых на температурной зависимости $\text{tg}\delta$ образуется плато с высоким значением этой величины, рассмотрена в работе [6]: предлагается использовать для ее решения как одномодульные, так и градиентные материалы на основе ПУ и полиизоциануратов.

Проблема создания ВПМ с широким температурным (частотным) диапазоном демпфирования решается путем получения полимерных систем со сложной микрофазной структурой и исследования их вязкоупругих свойств. К таким системам относятся смеси полимеров со структурой полу-взаимопроникающих и взаимопроникающих сеток (полу-ВПС и ВПС).

Подобные вибропоглощающие материалы описаны в патентах ВМФ США и Essex Specialty [7,8]: акустические демпфирующие материалы с улучшенными свойствами на основе взаимопроникающих сеток, имеющие мягкие и жесткие полимерные компоненты. Мягкий компонент (ПУ) получается в результате реакции полимеризации ароматического диизоцианата с гликолем полиалкиленового эфира, а жесткий компонент (винилэфирный полимер) – винилэфирной смолы. Материал имеет микрофазовую доменную структуру и в зависимости от состава композита коэффициент механических потерь имеет максимумы при $T = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ или $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в интервале от 15 до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\text{tg}\delta \geq 0,2$. Следует отметить, что эта одна из немногих разработок, в которой отмечено, что с расширением температурного интервала вибропоглощения происходит снижение максимальной величины КМП.

В работе [9] исследованы акустические свойства двойных сополимеров на основе винилацетата, винилакрилата, изобутилена, стирола, бутилакрилата и бутилметакрилата в различных сочетаниях. Установлено, что расширение пика механических потерь происходит в том случае, если при полимеризации образуются неоднородные по составу макромолекулы.

При сополимеризации жестких гидроксилсодержащих смол с изоцианатами происходит удлинение цепи эпоксидного полимера и появление в ней α - и β -процессов, что приводит к увеличению подвижности сегмента, а, следовательно, к повышению вибропоглощающих свойств полимера [1].

Из приведенных примеров видно, что направленный выбор состава вязкоупругого материала и процентного содержания в нем сополимеров позволяет существенно изменять не только область частот эффективного вибропоглощения, но и влиять на величину потерь [10].

Известно, что слабо вулканизованные каучуки образуют мягкие резины, величины T_g которых лежат значительно ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а эффективная область вибропоглощения охватывает интервал $-40\dots-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Образование гетерогенных систем типа полу-ВПС и ВПС на основе компонентов с сильно различающимися T_g , например, эластомеров и сетчатых олигомеров, позволяет существенно расширить температурный диапазон эффективного демпфирования за счет рассеивания энергии при трении гибких цепей [11]. ВПС на основе ПУ и эпоксидных смол изучены в работах [12,13]. Установлено, что использование удлинителей цепи ведет к фазовому разделению и расширению пика механических потерь, а также сдвигу его в область высоких температур.

В работе [14] сравниваются области потерь физических смесей ПМВЭ/ПС и ВПС на их основе. Показано, что ВПС имеют более широкую переходную область, чем соответствующие смеси, что объясняется пониженной совместимостью ВПС. Авторами работы [15] в качестве нового перспективного демпфирующего материала предложены смеси цис-1,4-ПИ и 1,2-ПБД.

В полимерной цепи отвержденной эпоксидной смолы рассеяние энергии обуславливается вращением только групп CH_2 . При отверждении эпоксидной смолы алифатическими аминами происходит связывание концов полимерных цепей жесткими связями, что приводит к снижению их подвижности. Поэтому отвержденные эпоксидные смолы хрупкие и будут иметь низкий коэффициент потерь. Вибропоглощающие свойства полимеров зависят от степени их отверждения. Увеличение содержания в ВПМ не отвержденного полимера способствует повышению коэффициента потерь и приводит к снижению модуля упругости [1].

Влияние наполнителей на T_g полиуретанов (ПУ) показано в работе [6], где для получения ВПМ с высоким плато на температурной зависимости КМП предлагается использовать градиентные ВПМ (монолитные или слоистые) на основе ПУ. Аналогичную цель преследуют авторы статьи [16]. В указанной работе авторы полагают, что слоистый ВПМ будет иметь хорошие демпфирующие свойства, если один из полимерных слоев с более высокой T_g будет иметь меньшее значения модуля по сравнению с другим полимерным слоем, имеющим более низкую T_g . Эта зависимость реализуется в слоистом ВПМ, описанном в [17], чем объясняются его высокие демпфирующие свойства.

1.2.2 Использование наполнителей для повышения вибропоглощающих свойств полимеров

Наряду с такими методами, как разработка специальных сополимеров и создание ВПС и полу-ВПС, перспективным способом является формирование композиционных материалов, состоящих из полимерной матрицы и наполнителя. Для наполненных полимерных систем характерно наличие дополнительных релаксационных переходов, связанных с подвижностью частиц наполнителя в среде полимера. Часто наполнитель увеличивает относительные потери, особенно если находится в высокоэластичном состоянии. Дополнительным источником диссипации механической энергии служит трение между частицами наполнителя и полимером, при отсутствии адгезии между ними, а также трение между контактирующими частицами наполнителя, например, в агрегатах частиц. Кроме рассеяния энергии, связанного со сдвиговым взаимодействием наполнителя и матрицы, вклад в затухание могут давать неоднородности распределения частиц и термические напряжения.

В качестве дисперсных наполнителей в составе ВПМ используют минеральные и органические порошки. Вид и качество наполнителя, а также форма и размеры его частиц влияют на демпфирующие свойства композиционного материала. По форме частицы наполнителя могут быть волокнами, пластинами или чешуйками, сферами, монокристаллами. По свойствам минерала наполнители подразделяются на слабоактивные и имеющие свободные валентности для связи с полимером. К первым относятся маршаллит и легкие наполнители, а ко вторым – листоватые, игольчатые и нитевидные минералы (асбест, слюда и различные глины).

Наиболее эффективными для получения ВПМ являются наполнители чешуйчатой или пластинчатой формы, например, слюда или графит. По степени убывания эффективности влияния на демпфирующие свойства наполнители различной формы можно расположить следующим образом: слюда, графит > каолин, тальк, асбест, алюминиевая пудра > железный порошок, сажа. В работе [18] показано, что введение слюды и графита в хлор-бутилкаучук (CIIR) и нитрил-эпихлоргидриновый каучук (NBR-ECO) приводит к повышению коэффициента механических потерь. Оптимальное содержание наполнителя находится в пределах $\nu=0,5-0,7$.

Экспериментально доказано, что, как правило, при добавлении наполнителя в количествах, превышающих 30-40% масс., наблюдается снижение демпфирования в таком полимере. Волокна для ВПМ оказались малоэффективными, поскольку при наполнении ими модуль потерь изменяется незначительно [1, 4]. Имеются сведения о вибропоглощающих композициях на основе полиолефинов, полиамидов и каучуков и их смесей и армирующего наполнителя [19, 20].

Важным фактором, влияющим на свойства ВПМ, является дисперсность наполнителя. Увеличение удельной поверхности до 1000-1500 см²/г незначительно повышает коэффициент

потерь и не изменяет модуль упругости. Дальнейший рост дисперсности приводит к снижению коэффициента потерь и увеличению модуля упругости композита. Вибропоглощающие свойства композиционных материалов наиболее эффективны при введении наполнителя с удельной поверхностью 1000-2500 см²/г.

На основании представленных данных можно сделать вывод, что практически любой полимерный материал обладает в той или иной мере свойствами вибропоглощения, но как сказано выше, особое внимание при разработке ВПМ уделяется полиуретанам и термоэластопластам на их основе.

Для получения материалов с высокими виброгасящими свойствами широко используются полимерные композиции на основе полиуретанов, например, ПУ с ММ=3000-10000 с $T_g = -50 \dots -30$ °С, на основе полиэфиров и диизоцианата при соотношении компонентов 100/20:10/100 [21] или термопластичного ПУ несколько отличающегося состава, полученного из алифатического полиэфира, 2,4-толуилендиизоцианата и удлинителя цепи. ММ полимера находится в пределах 900-3000, T_c от -80 до 10°С [22]. Эти материалы характеризуются эффективным вибропоглощением в широком диапазоне частот при температурах ниже 20 °С. На основе ПУ созданы эффективные вибропоглощающие мастичные покрытия с $\text{tg}\delta_{\text{max}} = 0,19-0,29$, проявляющие максимальные демпфирующие свойства при T от -12 до +6 °С [23].

1.3. Шум в кабине и салоне самолета: его источники, негативное действие на человека, способы борьбы с ним

Звуковое поле внутри кабины и салона самолета обусловлено многими источниками, относительный вклад которых может меняться в зависимости от типа и класса самолета. Выбор наиболее эффективных мероприятий для снижения шума самолета в каждом конкретном случае может быть произведен только после определения основных источников шума.

Акустики разделяют внешний шум, проникающий внутрь салона самолета, на воздушный и структурный шум. Шум, поступающий внутрь самолета воздушным путем – это шум, излученный внешними источниками (например, винты, выхлопной шум) и распространяющийся через акустическую среду (воздух), а затем передаваемый через фюзеляж самолета. Шум, источником которого является энергия вибраций от удаленного источника (например, двигателей, винта, флаттеров крыла), называют шумом, распространяющимся по конструкции или структурным шумом. Структурный шум играет важную роль в функционировании воздушных и наземных транспортных средств, кораблей и строительных сооружений. Наиболее остро проблемы защиты от шума стоят в низкочастотном диапазоне, где наблюдаются резонансные колебания конструкций.

Источники шума самолетов можно разделить на две группы: внешние и внутренние. Основными внешними источниками шума являются силовая установка и пограничный слой (толщина которого в носовой части самолета составляет около 13 мм и возрастает до 30 см в хвостовой). Основными источниками шума силовой установки являются выхлопная струя и компрессор. Струя современного реактивного двигателя создает высокие уровни шума со сплошным спектром в широком диапазоне частот. Шум от компрессора состоит из дискретной, расположенной в области высоких частот, и широкополосной составляющих. Указанные источники шума, воздействуя на конструкции самолета, возбуждают колебания обшивки фюзеляжа, которые передаются в кабину и салон самолета в виде звуковых колебаний. Шум, обусловленный вибрациями двигателя, вызывается дисбалансом вращающихся деталей. При жесткой подвеске двигателей вибрации передаются на фюзеляж самолета, вызывая в конструкции интенсивные колебания и обусловленное ими излучение шума на частотах вращения валов турбины и компрессора.

Шум в кабине и салоне для любых режимов полета и различных типов самолетов во многом зависит от совершенства систем внутреннего оборудования, в том числе системы кондиционирования. Стандарты по шуму в самолетах преследуют цель создания благоприятных с точки зрения санитарных требований акустических условий для пассажиров и экипажа. Основными отрицательными факторами воздействия шума на пассажиров и экипаж самолета являются помеха речевой связи, а также раздражающее и утомляющее действия. Кроме того, для членов экипажа, постоянно работающих в условиях сильного шума, имеется опасность повреждения слуха [24]. Допустимые уровни шума в кабинах российских самолетов регламентированы ГОСТ 20296-81. Прослеживается тенденция снижения уровня шума в салоне самолета: в салоне Ту-134 составляет около 90 дБА, в салоне Ил-62 – 85 дБА (1970-ые гг.), Ил-86 – от 78 до 83 дБА (1980 г.), Ту-204 – от 75 до 83 дБА, уровень шума в салоне современного самолета Сухой Суперджет составляет около 80 дБА.

Применяемые в современной авиационной технике методы борьбы с шумом можно условно разделить на активные и пассивные. Активными являются методы, при которых снижения шума добиваются путем воздействия на механизм образования шума, например, применением малошумных двухконтурных двигателей, уменьшением скорости потока в системе кондиционирования самолета, рациональной компоновкой шумящих агрегатов (в особенности силовой установки) относительно пассажирского салона. Возможности снижения шума в салоне самолета с помощью рассмотренных методов могут быть наиболее полно реализованы в том случае, если они предусмотрены на стадии проектирования. К пассивным средствам снижения шума в кабине и салоне самолета относятся хорошо известные в акустике методы звукоизоляции и вибропоглощения. Эти методы звукоизоляции могут успешно применяться как на стадии

Одним из эффективных способов снижения уровня шума и вибрации является применение в конструкциях, испытывающих повышенный уровень вибрационных и акустических нагрузок, материалов с высокими демпфирующими свойствами (вибропоглощающих материалов или ВПМ).

19

Покрытия такого типа были использованы в турбовинтовых самолетах и вертолетах для снижения шума в области разборчивости речи, т.е. в области частот 600-5000 Гц. С этой же целью фирма Боинг использовала материал «Scotchfoam tape G-9052» (производства фирмы «3М») и рулонную алюминиевую фольгу типа 428А и G-9162, которые наклеивались между стрингерами и вокруг иллюминаторов подобно обоям. Вибропоглощающее покрытие может наноситься также на различные конструкции внутри салона – перегородки, короба, полки, трубопроводы, являющиеся дополнительным источником шума в салоне [2-4].

Первоначально вибропоглощающие материалы использовались в виде покрытий, наклеиваемых на всю или почти всю площадь панели, колебания которой требовалось уменьшить. Например, на самолетах франко-итальянского концерна ATR и американской фирмы McDonnell Douglas - ATR-72, MD-80 и DC-9 вибропоглощающее покрытие было нанесено практически на всю поверхность обшивки, панелей интерьера, пола передней и задней перегородок. Схема размещения вибропоглощающего материала на самолете ATR-72 приведена на рис.1.1. На рисунке 1.2 приведены примеры использования вибропоглощающего материала SoundEx™, что, согласно информации производителя, позволило снизить уровень шума в салоне на 4-10 дБ [25].



Рисунок 1.2. Примеры применения вибропоглощающего покрытия Sound Ex™ в конструкции самолета.

Модификации моделей самолетов ATR 42 и ATR 72 - самолеты ATR 42-500, ATR 72-500 и ATR 72-210 - превосходят своих предшественников по снижению шума и вибрации, благодаря наличию активных демпферов на шпангоутах и вибропоглощающего материала на обшивке фюзеляжа в плоскости вращения винтов [26].

Одним из основных путей передачи шума и вибрации в салон являются панели пола, представляющие собой трехслойную конструкцию - два несущих слоя из полимерных компо-

зиционных материалов (ПКМ) и расположенный между ними легкий наполнитель, как правило, сотовый [27]. Для устранения данной проблемы на панели пола наносят вибропоглощающее покрытие. Пример – самолет DC-9, в котором вибропоглощающий материал марки E-A-R C-2003-05 PSA (AearoTechnologies, входящая в 3M Company) наносился на 100% панели пола по всей длине кабины [28]. Таким же образом был использован листовой вибропоглощающий материал ВТП-1В на самолете президентского отряда ТУ-214. Однако недостатками подобного подхода являются увеличение массы конструкции и дополнительные расходы по установке покрытия.

Для повышения демпфирующих свойств панелей пола компанией Boeing предложена конструкция, включающая полимерные соты между двумя обшивками, на одну из которых нанесен вибропоглощающий слой [29]. Панели пола, запатентованные фирмой Boeing [30], представляют собой слоистые конструкции с внутренним центральным сотовым слоем. Состав обшивки слоистого композита также может включать слои пластика, пропитанные связующим с повышенными демпфирующими свойствами.

Для обеспечения высокого уровня демпфирования жестких структур в конструкции самолета, таких как силовые элементы и композитные панели пола, американской фирмой Damping Technologies, Inc. предлагается использовать вибропоглощающий материал в виде полосок, которые наносят на определенные участки поверхности в зависимости от вида изгибающих мод этих поверхностей [31]. Предлагаемый в данном случае материал по структуре представляет собой популярные в последнее время «демпферы на отnose» или «отстоящие демпферы» («stand-off dampers»). Демпферы на отnose применяются для снижения вибрации различных перекрытий и перегородок в самолете, например, стенок кабины бортопроводников. Согласно мнению автора статьи [32] M.D.Rao, они отлично зарекомендовали себя для борьбы с вибрацией, шумом и усталостным износом.

1.4. Вибропоглощающие покрытия для применения в авиационной технике

Одним из наиболее распространенных средств борьбы с вибрациями являются вибропоглощающие покрытия, которые наносятся на элементы конструкций, подверженных воздействию вибраций. Самые ранние сообщения о применении вибропоглощающих материалов для снижения шума в салонах самолетов и вертолетов фирмы Боинг появились в 1958-1960 гг., где в качестве вибропоглощающих покрытий были использованы материалы фирм «3М» (США) и «Jhonson&Jhonson» (Великобритания) [24]. Материал фирмы «Jhonson&Jhonson» «Permacel tape № 12» представлял собой матерчатые полосы, на которые нанесен слой клея, усиленные снаружи фольгой. Он наносился на внутреннюю поверхность фюзеляжа в виде покрытий различной толщины, что позволило достигнуть максимального эффекта при минимальной массе. Поверх-

ностная масса демпфирующего покрытия в этом случае колеблется в пределах 0,976–1,852 кг/м², при этом общая масса покрытия на самолете составляла около 100 кг (см. таблицу 1.1). Применение вибропоглощающего покрытия снизило шум в диапазоне частот 600–4800 Гц на 5–9 дБ [33]. Покрытия такого типа были использованы в турбовинтовых самолетах и вертолетах для снижения шума в области разборчивости речи, т.е. в области частот 600–5000 Гц. С этой же целью фирма Боинг использовала материал «Scotchfoam tape G-9052» (производства фирмы «3М») и рулонную алюминиевую фольгу типа 428А и G-9162, которые наклеивались между стрингерами и вокруг иллюминаторов подобно обоям. Вибропоглощающее покрытие может наноситься также на различные конструкции внутри салона – перегородки, короба, полки, трубопроводы, являющиеся дополнительным источником шума в салоне [34, 35, 36].

Таблица 1.1. Снижение шума при использовании различных вариантов вибропоглощающего покрытия «Permacel tape № 12» [33]

Количество демпфирующего материала		Снижение шума в диапазоне частот, дБ	
Вариант	Поверхностная плотность, кг/м ²	20–150 Гц	600–4800 Гц
1	0,488	0	3
2	0,976	2	5
3	1,464	3	7
4	1,858	5	9

Все перечисленные покрытия представляют собой липкую ленту, которая может состоять из одного слоя, или быть многослойной. В покрытиях такого типа эффект демпфирования обусловлен преимущественно сдвиговыми деформациями сравнительно мягких слоев, упрочненных металлической фольгой или слоями металла. Как правило, такие покрытия более эффективны, чем однородные покрытия, в которых эффект потерь связан, в основном, с деформациями растяжения и сжатия [37]. Установлено, что при одинаковом увеличении массы конструкции, существенно больший коэффициент потерь обеспечивает покрытие из нескольких слоев липкой ленты. Так, покрытия из двух слоев демпфирующей ленты «Permacel-45» обеспечивает пик коэффициента потерь ~0,1, тогда как у покрытия из четырех слоев того же материала коэффициент потерь приближается к 0,5 [33]. Материал «Scotchfoam tape G-9052» фирмы «3М» представляет собой многослойный материал, состоящий из слоя пенополиуретана и алюминиевой фольги, соединенных клеем. Материал имеет липкий слой. Общая толщина материала

ла 6,25 мм. При комнатной температуре коэффициент потерь алюминиевой пластины толщиной 1 мм с одним слоем покрытия близок к 0,15. Максимум демпфирования находится при температуре 0 °С и составляет 0,18. Коэффициент потерь не опускается ниже 0,05 при температурах от –40 °С до 70 °С [24, 38].

Одними из первых отечественных ВПМ были листовые пластмассы, приклеиваемые к металлическим конструкциям, или пластмассы мастичного типа, наносимые распылением или промазкой [39, 40]. В авиационной промышленности первые разработки вибропоглощающих покрытий для самолетов появились в 1967 году, когда рядом предприятий были созданы слоистые покрытия, состоящие из алюминиевой фольги с липким вязкоупругим слоем. Было предложено два типа вязкоупругих материалов для вибропоглощающих покрытий: на основе полисилоксанового производного с добавкой эластомера (КЛ-25) и на основе полиизобутилена [41]. Алюминиевый лист толщиной 1 мм с покрытием КЛ-25 (поверхностная плотность 1,2 кг/м²) имеет при комнатной температуре $\eta \sim 0,3$, при температурах от –20 до 50 °С $\eta \geq 0,05$. Покрытие на основе полиизобутилена, нанесенное на алюминиевый лист толщиной 1 мм (поверхностная плотность 2 кг/м²), обеспечивает при комнатной температуре $\eta \sim 0,2$ и при температурах от –30 до 100 °С $\eta \geq 0,05$.

Полимерные вибропоглощающие материалы можно использовать в виде композиционных ВПМ, мастик, самоклеющихся лент, слоистых материалов. Вибропоглощающие материалы подразделяются на следующие виды: мягких или жесткие вибропоглощающие покрытия и армированные ВПМ, или структуры типа «сэндвич».

Жесткое вибропоглощающее покрытие состоит из одного слоя вязкоупругого вибропоглощающего материала. Жесткое двухслойное покрытие – это структура, состоящая из двух отличающихся по свойствам вибропоглощающих материалов. В качестве таких покрытий используют композиционные материалы на основе поливинилацетата, поливинилхлорида, полиэфирной смолы [24, 1, 10]. Материалы для жестких вибропоглощающих покрытий бывают двух типов – листовые и мастичные. Первые наносятся на конструкцию с помощью клея, а вторые – напылением, шприцем, шпателем.

Мягкое вибропоглощающее покрытие представляет собой слой вязкоупругого материала, в котором при поперечных перемещениях поверхности демпфируемой пластины возникают упругие волны в направлении его толщины. Для его изготовления используют герметики и клеи, мастики, некоторые сорта листовой резины. Не менее эффективным оказывается применение в качестве мягкого покрытия вязкоупругого материала с содержанием воздушных пор, например пенополиуретана. Объем пор в материале составляет порядка 10-20%.

Для более эффективного гашения вибраций листовых конструкций применяют комбинированные покрытия, представляющие собой в основном сочетания ранее рассмотренных по-

крытий. Они совмещают несколько видов поглощения энергии. В зависимости от вида деформации, которой подвергаются вибропоглощающие полимерные материалы, их подразделяют на два типа: покрытия (extensional damping или free layer damping) и армированные ВПМ (constrained layer damping).

В процессе вибрации в вибропоглощающих покрытиях реализуются деформации растяжения-сжатия, и за счет этого происходит рассеяние вибрационной энергии. Армированные ВПМ включают «ограничивающий» армирующий слой (или два внешних слоя с прослойкой из полимерного материала), нанесенный на вязкоупругий полимерный слой, расположенный на вибрирующем субстрате. Очевидно, что армирующие слои имеют значение модуля упругости, превосходящее модуль полимерной прослойки. Эффект диссипации энергии в данном случае усиливается за счет сдвиговых деформаций, возникающих в вязкоупругом полимерном слое, помимо деформаций растяжения-сжатия. Принципиальная разница в механизмах деформации в ВПМ покрытиях и армированных вибропоглощающих материалах показана на рис.1.3.

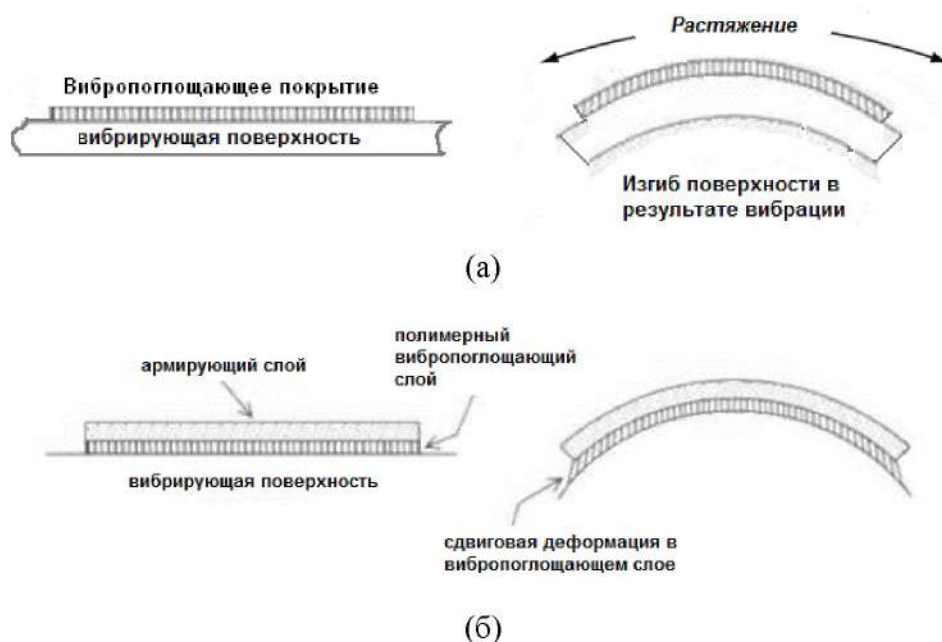


Рисунок 1.3. Схематическое изображение механизма диссипации энергии при деформировании вибропоглощающих покрытий (а) и АВПМ (б).

На свойства ВПМ (коэффициенты потерь и массогабаритные характеристики вибропоглощающих структур) влияет увеличение количества слоев в их структуре. При условии, что материал вязкоупругих слоев одинаков, определены максимальные значения коэффициентов потерь. Резкое возрастание $\eta_{\max}$ происходит при переходе от трехслойной структуры с одним внутренним вязкоупругим слоем к пятислойной с двумя внутренними вязкоупругими слоями. Дальнейшее увеличение числа вязкоупругих слоев, хотя и сопровождается некоторым повыше-

нием $\eta_{\max}$, приводит к существенному повышению массо-габаритных показателей слоистой структуры. Показано, что вибропоглощающая эффективность слоистой структуры слабо зависит от соотношения толщин вязкоупругих и упругих слоев (H_{Σ}/h_{Σ}) до значений $H_{\Sigma}/h_{\Sigma} \leq 1$ [10].

1.5. Армированные вибропоглощающие материалы

Наиболее эффективными ВПМ являются композиционные армированные вибропоглощающие материалы, состоящие из двух наружных жестких листов с полимерной прослойкой между ними. Подтверждением важности данного направления является большое количество охранных документов, выданных таким фирмам как Antiphon Inc., The Aerospace Corporation, Bayer, DuPont, Cytec Technology Corp., Farbwerke-Hoechst, Material Sciences Corporation, McDonnell Douglas Corporation, Nichias Corporation и др. [42-50].

Первоначально подобные ВПМ были созданы в 70-80 годы 20 века. Например, известны вибропоглощающие «сэндвичевые»-системы, состоящие из внешних жестких стальных листов толщиной 0,5 мм и вибропоглощающего внутреннего слоя толщиной 0,3 мм на основе наполненного (шпат, графит, сажа) сополимера этилена (20-40%) и винилацетата (80-60%), при этом соотношение толщин слоев очень важно и может быть от 1:1 до 1:4, а КМП составной конструкции превышает 0,05 в интервале температур от 0 до +50°C [51], полиэпоксида, амина простого полиэфира, гетероциклического амина и фенола [52], имеющие широкий интервал эффективного вибропоглощения, но неработоспособные в течение длительного времени. Также известны армированные вибропоглощающие материалы на основе битума и асбеста [53], которые, однако являются тяжеловесными и неэкологичными.

В настоящее время тенденция использования слоистых армированных материалов сохраняется повсеместно, и различия в вариантах их исполнения относятся лишь к составу вибропоглощающей композиции, из которой выполнена вязкоупругая полимерная прослойка, специальным требованиям, предъявляемым к материалам и устранению недостатков ВПМ предшествующих поколений. Следует отметить, что в области создания вибропоглощающих композиций наблюдается тенденция разработки составов на основе полимеров сложных и простых эфиракрилатов и метакрилатов, а также полиуретанов и взаимопроникающих сеток.

Существует мнение, что наилучшим решением задачи снижения вибраций и шума металлических покрытий было бы выполнение вибрирующих частей конструкций из вибропоглощающих сплавов без каких-либо дополнительных вибропоглощающих материалов. Однако большинство металлов и сплавов имеют относительно низкие ($\text{tg} \delta \leq 0,01$) или трудно предсказуемые вибропоглощающие свойства. Решение поставленной задачи заключается во введении вибропоглощающего материала толщиной около 1 мм между слоями металла. При такой толщине прослоек в «сэндвиче» клепаные соединения резко снижают их вибропоглощение. Уста-

новлено, что при надлежащем подборе материала прослойки её толщина должна составлять до 20-30 мкм. О важности соотношения толщин армирующего и вибропоглощающего слоев указывается в патенте [51] немецкой фирмы Farbwerke-Hoechst Aktiengesellschaft от 1972 года. Тенденция к использованию тонкой полимерной прослойки сохраняется и по сей день: американской фирмой Material Sciences Corporation в 2001 году запатентован композиционный материал [54], состоящий из двух наружных листов металла и внутренней полимерной прослойки между ними толщиной менее 0,5 мм, снижение толщины которой достигается за счет многократной прокатки ВПМ. В данном случае вязкоупругий материал выполняет не только функцию вибропоглощения (при этом $\text{tg}\delta=0,02-0,04$ при $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$), но и проявляет клеящие свойства, соединяя внешние слои. Аналогичный материал разработан международной фирмой Antiphon, в котором толщина полимерной прослойки достигает всего лишь 0,03-0,2 мм [42].

В 2007 году (Material Sciences Corporation) разработан и запатентован композиционный вибропоглощающий материал, в котором устраняются такие недостатки слоистых армированных ВПМ, как добавочная масса и неспособность точно повторять форму сложных по конфигурации вибрирующих поверхностей, а, следовательно, невозможность плотно прилегать к ним для обеспечения необходимого эффекта демпфирования [53]. Первая проблема особенно актуальна в авиационной промышленности, а вторая – в автомобильной промышленности [56]. Решение достигается за счет того, что вязкоупругий вибропоглощающий слой (бутадиен-нитрильный каучук (БНК), фторкаучук, полиакрилат или продукт полимеризации метакриловой кислоты) помещается внутрь непрерывного армирующего слоя. Так как получаемый компонент легко формуется, ему можно придать желаемую форму, включая детали сложной конфигурации.

Стремление обеспечить высокую адгезию в армированном ВПМ к вибрирующей поверхности продолжено в современных разработках фирмы Material Sciences Corporation [57]. Поскольку большинство клеев для высокотемпературного применения проявляют демпфирующие и адгезионные свойства в области высоких температур, то предлагается использовать самоклеящийся армированный ВПМ, включающий клеевой слой на основе смеси силикоанового каучука и липкой силикатной смолы. При этом основной вязкоупругий слой может быть выполнен из полиакрилата или полиуретана, $\text{tg}\delta=0,04-0,06$ при $T=23^{\circ}\text{C}$. Максимальное вибропоглощение наблюдается в области температур от 75 до 92 $^{\circ}\text{C}$ и $\text{tg}\delta$ составляет 0,06-0,14.

Внешние слои армированного вибропоглощающего материала могут быть выполнены не только из металла, но и из любого другого материала, превосходящего по модулю или более жесткого, чем полимерная прослойка. Например, американская фирма Cytex Technology Corp. занимается разработкой полимерных композиционных материалов (ПКМ), в которые для повышения вибропоглощающих свойств, внедрены прослойки из вибропоглощающих полимер-

ных термопластичных материалов в виде нетканых материалов, пропитанных связующим [58]. КМП данного материала при частоте 100 Гц и температуре от -40 до 20°C составляет 0,02. В 2012 году подобные работы были продолжены - предлагается использовать несколько слоев термопластичного эластомера (например, на основе этилен-пропиленового каучука (СКЭП) и жестких стирольных блоков), отверждающихся градиентно. Коэффициент механических потерь такого материала при частоте 100 Гц в диапазоне температур от -50 до 20°C изменяется от 0,0095 до 0,0267 [59].

Американские фирмы Innercore Grip Company, Sting Free Technologies Company и Matscitechno Licensing Company, в отличие от предыдущих производителей, вводят армирующие наполнители (высокопрочные арамидные волокна или нетканые материалы на их основе) в структуру полимерных вибропоглощающих слоев: термозластопласты с прослойкой из арамида представлены в [60] и [61], с сеткой из «Кевлара» – в [62]. Конкретные значения КМП таких композиционных вибропоглощающих материалов не представлены, однако описывается механизм демпфирования, сходный для всех материалов: вибрационная энергия, которая не была полностью поглощена или рассеяна первым полимерным слоем, равномерно распределяется прослойкой из высокопрочных волокон по второму полимерному слою и рассеивается.

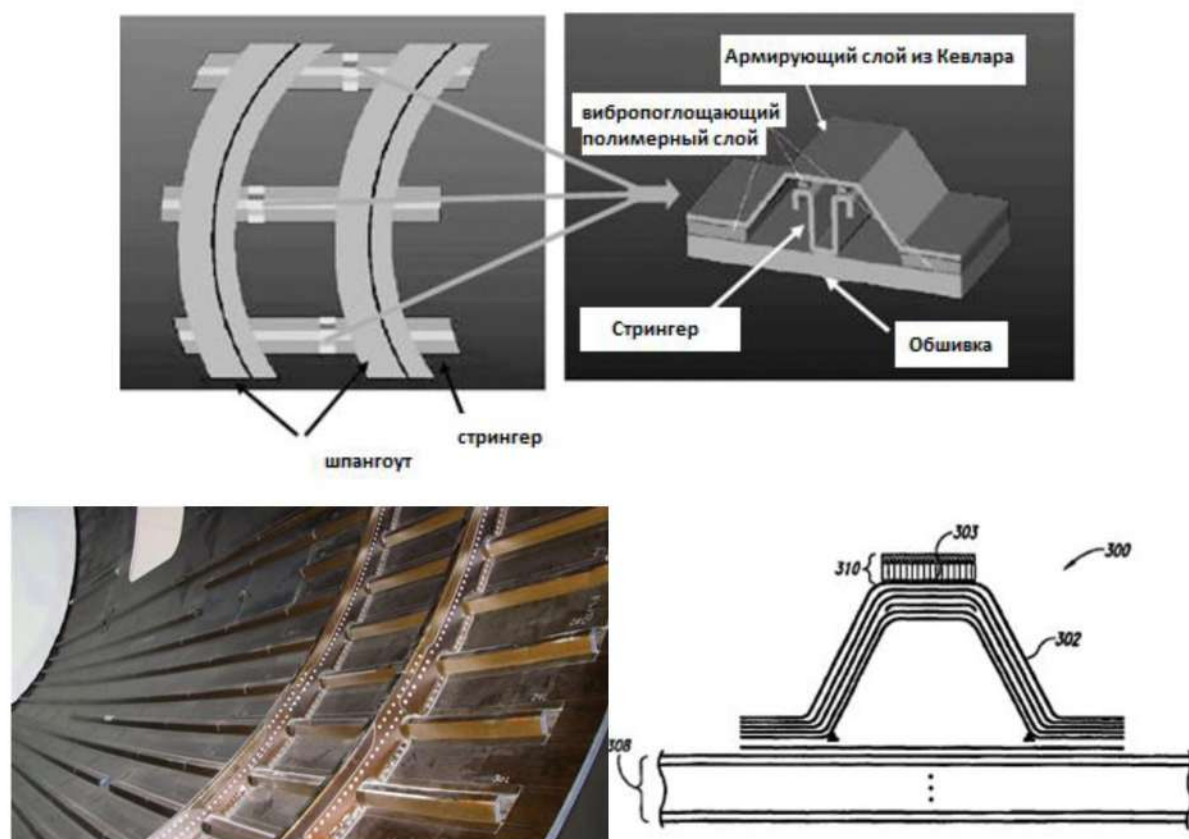


Рисунок 1.4. Схема демпфирования hat-section стрингеров, в том числе с армированным ВПМ (элемент 310).

По мнению ученого из Мичиганского Технологического Университета M.D. Rao, Следующим этапом создания ВПМ для авиакосмической отрасли является использование отстоящих демпферов (stand-off damper), позволяющих увеличить сдвиговые деформации в слое ВПМ, а также балочных демпферов (I-beam damper), как правило, выполняемых из Кевлара и наклеиваемых на жесткий линейный стержень малой массы [32]. Увеличение эффективности демпфирования во втором случае происходит вследствие того, что деформации слоя по его толщине в таком случае существенно увеличиваются и в сочетании со сдвиговыми деформациями это приводит к значительному увеличению потерь энергии в полимерном слое.

Балочные демпферы представляют собой имитаторы стрингеров. Такие демпферы применяются в конструкции некоторых широкофюзеляжных самолетов, например, Боинга 747, летные испытания которых показали, что уровни вибрации низших мод благодаря их использованию уменьшились более чем на 10 дБ.

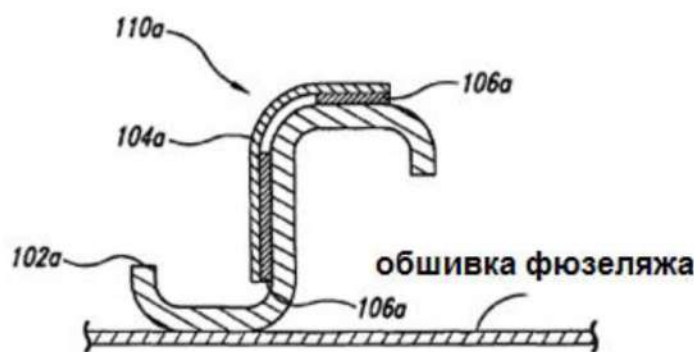


Рисунок 1.5. Схема демпфирования Z-section стрингеров

Двигатель самолета, расположенный под плоскостью крыла, является источником структурного шума, вызывающего низкочастотные колебания фюзеляжа. Через силовые элементы фюзеляжа (стрингеры и шпангоуты) вибрационная энергия передается в салон и вызывает значительный шум. Один из способов решения данной проблемы – нанесение армированных вибропоглощающих материалов на стрингеры и шпангоуты. Однако, по словам исследователей (M.D. Rao), такая схема использования армированного вибропоглощающего материала не оправдала себя для Z-section стрингеров (102a на рисунке 1.5), для которых применяется демпфирующая система (110a), состоящая из вибропоглощающего полимерного адгезионного слоя (106a) и армирующего слоя из алюминия (104a).

В патенте [63] фирмы McDonnell Douglas Corp. (2001 г.) предлагается наносить демпфирующий вязкоупругий материал (26) не на всю поверхность панели фюзеляжа, а только на определенные её участки – границы или углы. Утверждается, что это приводит к снижению из-

лучаемого панелью звука на 5-12 дБ в области частот 500-4000 Гц. Этой тенденции следуют как европейские, так и американские производители.

1.6. ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами

В настоящее время ПКМ в качестве конструкционных и функциональных материалов широко применяются в производстве различных видов техники. Например, пассажирские и транспортные самолеты имеют в общей массе конструкции свыше 50 % ПКМ, а военные - 25-30 %. Тенденция к постоянному росту применения ПКМ наблюдается и в вертолетостроении, где их средняя масса уже достигла 45-55 % [64].

Однако существует мнение, что акустически неблагоприятные свойства фюзеляжа летательных аппаратов из волокнистых композитных материалов по сравнению с монолитными металлическими материалами требуют более совершенной виброакустической изоляции. При этом 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, усталостных и прочностных характеристик для всех видов нагружения.

В общемировой практике наука в области вибропоглощающих материалов (ВПМ) прошла последовательные стадии развития от разработки однослойных вибропоглощающих покрытий, слоистых армированных материалов, в том числе материалов типа «сэндвич», до создания ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами.

Применение вибропоглощающего покрытия 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. Кроме того, в большинстве случаев изделия из ПКМ имеют поверхность сложной конфигурации, что затрудняет нанесение на нее вибропоглощающих покрытий.

Альтернативным решением поставленной задачи является разработка ПКМ с интегрированным в его структуру (на стадии формования) вибропоглощающим слоем, который под действием изгибающих нагрузок испытывает сдвиговые деформации относительно слоев ПКМ и таким образом рассеивает вибрационную энергию. При этом отпадает необходимость использования дополнительного армирующего слоя, так как в его качестве выступают слои ПКМ, что приводит к экономии массовых и трудовых затрат.

Как уже было упомянуто выше, одним из самых распространенных видов вибропоглощающих материалов являются так называемые материалы типа «сэндвич», состоящие из двух наружных жестких листов с полимерной прослойкой между ними, появившиеся в 70-80 годы 20

века. Причем изначально большую известность приобрели «сэндвич» - системы, состоящие из внешних металлических листов и вибропоглощающего внутреннего слоя на основе различных полимеров. Спустя почти десятилетие с развитием техники и науки о ПКМ стали появляться аналогичные сообщения о материалах с повышенными вибропоглощающими свойствами, в которых внешние слои были выполнены из жестких слоев пластика на основе стеклянных, арамидных или углеродных волокон, сотовых панелей [64-69]. Указанные технические решения, по мнению авторов, позволяют получить жесткие и легкие материалы с высокими демпфирующими и прочими свойствами (например, звукопоглощающими).

Как уже было упомянуто выше, в процессе вибрации в зависимости от наличия армирующего слоя полимерная вибропоглощающая прослойка может подвергаться различным видам деформации – растягивающим, изгибающим и сдвиговым. Однако, по имеющимся сведениям [69], на данный процесс оказывает влияние также и анизотропия свойств армирующего слоя. Так, поскольку металлические армирующие листы не обладают анизотропией, то вибропоглощающие свойства композита могут быть повышены только в случае работы материала на изгиб, а не на растяжение. Таким образом, в случае, когда вязкоупругий материал заключен между композиционными слоями с различным направлением выкладки армирующего наполнителя, при растяжении ПКМ соответствующие слои деформируются в различных условиях вследствие их анизотропии, поэтому вибропоглощающий слой подвергается сдвиговым деформациям, вследствие чего происходит значительная диссипация вибрационной энергии. При работе ПКМ в условиях изгибающих нагрузок деформация вибропоглощающего слоя проходит по описанному выше механизму для армированных ВПМ.

Исследования по влиянию природы армирующих слоев (металлический, композиционный) на демпфирующие свойства составной конструкции проведены учеными из индийского Anna University (Department of Mechanical Engineering, College of Engineering) [70]. Показано, что для получения стеклопластика с повышенными демпфирующими свойствами в сочетании с высокими прочностными свойствами и жесткостью наиболее эффективной является ориентация конструктивных слоев под углом $[90^\circ/0^\circ/\pm 60^\circ]$. Коэффициент механических потерь полученного ПКМ, соответствующий 1-ой моде, при этом составляет 0,0084.

Для сравнения стоит привести результаты исследования, спонсированного фирмой TORAY Industries и посвященного повышению демпфирующих свойств углепластика посредством интегрирования в его структуру внутренних вибропоглощающих слоев на основе термопластичного полиуретана, иономера - сополимера этилена/метакриловой кислоты/акрилового эфира и полиамида-12 различных типов, проведенного авторами статьи [71]. Установлено, что внедрение вибропоглощающих слоев в структуру ПКМ оказывает значительный эффект на их демпфирующие свойства. Так, коэффициент механических потерь углепластика с внутренним

вибропоглощающим слоем возрастает на один-два порядка (от 0,001 и 0,01 до 0,1) по сравнению с не содержащим такого слоя в диапазоне частот от 100 до 2000 Гц для всех исследованных направлений выкладки армирующего наполнителя (0° , 45° , 90°). При этом существенным недостатком остается снижение прочностных характеристик - снижение модуля при изгибе может достигать от 15-25% до 50%. Также авторами показано, что резонансные частоты ПКМ определяются направлением выкладки препрега, что позволит в дальнейшем, например, регулировать в требуемом направлении резонансную частоту колебаний детали (лопатки) путем изменения схемы укладки волокон без изменения геометрических размеров детали, что совершенно исключается при применении металлов. Вязкоупругие свойства внедряемых в структуру ПКМ полимерных пленок полностью отражали таковые слоистых материалов при соответствующих температурах. Однако помимо КМП указанных пленок на $\text{tg}\delta$ композита оказывает влияние и их жесткость при резонансных частотах. В целом авторами еще раз подтверждается, что влияние на демпфирующие характеристики оказывают не только термодинамические свойства внутреннего полимерного слоя, но и расположение конструктивных слоев на основе углеродных волокон, поскольку им определяется жесткость межслоевой области и напряжения, возникающие в вибропоглощающем слое, что также будет показано ниже.

Важным параметром, относящимся к изготовлению слоистого ПКМ, также является состояние и подготовка вибропоглощающего слоя или «элемента», внедряемого в структуру композита. Вязкоупругий слой может быть размещен между конструктивными слоями композита как в виде пленочного материала в отвержденном или полу-отвержденном состоянии, так и представлять собой некую слоистую конструкцию или листы препрега, полученного пропиткой слоев армирующего наполнителя ПКМ используемым полимерным составом. Некоторые изобретатели считают, что первый вариант является более предпочтительным, поскольку позволяет обеспечить равномерную толщину интегрированного слоя и избежать возможной реакции между полимерным материалом, из которого он изготовлен, и связующим ПКМ. В тоже время авторы статьи [72] считают, что выбор вязкоупругого материала для интегрирования в структуру ПКМ зависит также от состояния материала не только во время процесса изготовления композита, но и во время его работы в составе конструкции. Например, для придания конструктивных свойств желательно, чтобы внедряемый полимер находился в стеклообразном состоянии, в то время как для повышения демпфирующих свойств предпочтительнее переходная область в районе температуры стеклования. Очевидно, что немаловажным также является термическая стабильность вибропоглощающего слоя при изготовлении ПКМ. В результате исследований установлено, что более стойким к воздействию температуры по сравнению с акриловым полимером при отверждении является кремнийорганический полимерный материал Smacwgar производства французской фирмы SMAC. Авторами делается акцент на необходимость учитывать

изменения в свойствах интегрируемых в структуру ПКМ полимерных слоев во время отверждения - повышение модуля сдвига акрилового полимера на 60% с одновременным снижением КМП на 20%, одновременное отверждение при изготовлении композита приводит к снижению $\text{tg}\delta$ уже на 50% из-за диффузии связующего в вязкоупругий материал, указанные прочностные свойства пленки при этом возрастают в 2-5 раз. На кремнийорганический полимер данный процесс не оказывает влияния благодаря тому, что он находится в эластичном состоянии.

Стоит отметить, что фирма SMAC является одной из ведущих организаций на европейском рынке, предлагающая полуфабрикаты для интегрирования в структуру ПКМ для повышения демпфирующих свойств. Так, наряду с уже упомянутым материалом Smacwgar, перспективной является их разработка для звукоизолирующей конструкции самолета – SMAC CDS, представляющая собой слои специальной резины для интегрирования в структуру жестких композитов. Свойства предлагаемого материала позволяют ему выдерживать процесс одновременного отверждения с пластиком на любой основе (стекло-, углеволокинстые композиты, сотовые конструкции, материалы на основе арамидных волокон). Производитель утверждает, что применение указанного материала позволит повысить звукоизоляцию сэндвич-панели почти на 13 дБ в диапазоне частот 1000-4000 Гц, а также улучшить стойкость ПКМ к удару, таким образом продлевая жизненный цикл деталей.

Другой продукт – материал марки Smacsonic данного производителя используется представителями EUROCOPTERFRANCE [73]. Авторами изобретения предлагается звукоизолирующая декоративная панель симметричной структуры для применения в конструкции вертолета, состоящая из сердечника на основе гибкой самозатухающей меламиновой пены производства Rohacell с обшивками из ПКМ гибридной структуры, между слоями которых заключен упомянутый вибропоглощающий материал, работающий по типу «constrained layer damping».

Фирмой Cytec разработан аналогичный по структуре ПКМ [58], имеющий в качестве центрального внутреннего слоя сотовую конструкцию. При этом вибропоглощающие слои в виде нетканого материала также интегрированы в состав внешних слоев обшивки и представляют собой термопластичный эластомер, сополимер таковых или полиэфиры (например, марки Hytrel), полиамиды, полиолефины, и в процессе изготовления частично или полностью пропитываются связующим. В некоторых случаях поверхность полимерного слоя может быть обработана плазмой для достижения поверхностного натяжения 35 Дин/см. Коэффициент механических потерь материала при частоте 100 Гц в интервале температур от -50 до +20 °C составляет $\text{tg}\delta=0,0131 \div 0,0255$. Важно также отметить, что наличие внутреннего вязкоупругого слоя не должно вызывать снижения прочностных характеристик (сжатие после удара) более чем на 10 % и температуры стеклования композита более чем на 10 °C, т.е. материал из которого он изготовлен должен быть практически инертным по отношению к полимерной матрице ПКМ. Авто-

рами показано также, что при использовании вместо нетканого термоэластопласта слоя полимерной пленки, например, резины марки Smactane производства фирмы SMAC приводит к значительному снижению межслойной адгезии из-за ее изотропной структуры. Полимерная пленка выступает в качестве барьерного слоя в структуре композита. Поэтому для обеспечения высокой прочности связи между слоями необходимо создать сшитую поверхность между матрицей и нетканым материалом. Предлагаемый материал имеет авиационное назначение и рекомендуется для изготовления элементов обшивки фюзеляжа, стрингеров и шпангоутов.

Представителями японской фирмы TohoTenax предлагается слоистый материал для применения в конструкции мотогондолы двигателя самолета [74], также включающий сердечник, выполненный из акустических сот толщиной от 5 до 200 мм (однако могут быть использованы и полимерные пены, как в предыдущих примерах), с обшивками из ПКМ, содержащих внутренние вибропоглощающие слои, на основе армирующего наполнителя того же состава, что и конструкционные слои, а матрица (ПЭЭК, поли-эфиримид, ПСФ, полиакрилат, ПА, ПС) содержит органическую присадку (от 5 до 50%), повышающую демпфирующие свойства – соединение бензотиазидовой группы или дифенилакрилат, и неорганический наполнитель (слюда, частицы карбоната кальция или сульфата бария).

Таким образом, видно, что не все разработчики оставили попытки повышения вибропоглощающих свойств композита за счет модификации демпфирующих свойств полимерной матрицы. Например, в заявке DuPont-TorayCoLtd. [75] предложен ПКМ на основе армирующего наполнителя (стекло-, угле-, арамидного волокна) и термопластичного эластомерного компонента, содержащего жесткие и мягкие сегменты ароматического и алифатического полиэфиров соответственно, смолы на основе поливинилового спирта, антиоксиданта и связующего агента силановой группы. Авторы полагают, что данный вид полимерной матрицы является более предпочтительным по сравнению с реактопластами и жесткими термопластичными связующими (например, полибутилентерефталатом) не только с точки зрения повышения вибропоглощающих свойств композита, но и скорости совмещения с волокном – от 1 до 30 минут вместо 1-3 часов, а также адгезии к армирующему наполнителю. Связующее совмещается с армирующим наполнителем посредством нанесения его водной дисперсии или порошка с последующим нагреванием (в случае водной дисперсии – сушкой для удаления влаги) и отверждением матрицы.

Высокие демпфирующие свойства связующего из плавких композиций термопластичных вулканизатов (и ПКМ на их основе) также установлены автором изобретения [76], принадлежащего компании E.I. DuPont de Nemours and Co. Предлагаемые композиции представляют собой двухфазные материалы, состоящие из матрицы на основе сополимера простого и сложного эфиров (например, материала марки Hytrel производства фирмы DuPont-Toray) (15-75%) и

дисперсной фазы из полиметакрилата или полиэтилена/полиметакрилата (25-85%), имеют предпочтительную толщину от 200 до 500 мкм и предлагаются для интегрирования в структуру слоистых пластиков. Материал в свободном состоянии имеет довольно высокие демпфирующие свойства (максимальное значение КМП 0,10-0,46 при температурах -25, -47 °С) и рекомендуется для применения в автомобильной промышленности.

Препрег и ПКМ на его основе, состоящий из армирующего наполнителя и эпоксидного связующего (бисфенольного типа) со слоем нетканого материала из термоэластопласта (на основе ПС, ПВХ, ПУ, ПА, иономера) или полиолефина (ПЭ, ПП, ПБ), имеющего $\text{tg}\delta \geq 0,06$ при 10 °С предложен в заявке [77]. При этом термоэластопласт должен содержать жесткие и мягкие блоки. Ввиду высокой адгезии к эпоксидной матрице предпочтительнее использовать в этом качестве термопластичные эластомеры на основе полиамида или полиэфира (как и в предыдущем примере - марки Hytrel производства фирмы DuPont-Toray).

Авторы утверждают, что использование демпфирующего компонента в форме нетканого материала является более эффективным с точки зрения сочетания вибропоглощающих, прочностных свойств и жесткости композита по сравнению с использованием пленочного вибропоглощающего слоя, приводящего к повышению КМП, но также значительно снижающему его прочностные свойства и жесткость. Пропитка нетканого вибропоглощающего слоя связующим вызывает повышение его жесткости последнего, благодаря чему удастся избежать снижения прочностных характеристик композита, а само наличие слоя термоэластопласта приводит к повышению КМП слоистой конструкции. Также недостатком применения полимерной пленки для указанных целей является снижение липкости препрега. Также авторы считают, что, применение термоэластопласта в виде частиц, как было предложено выше в [75], также имеет ряд недостатков в сравнении с их изобретением: например, частицы вибропоглощающего компонента, имеющие меньшую, чем матрица жесткость, будут проникать в волокнистую структуру армирующего наполнителя, что может привести к ухудшению жесткости и прочности композита. При введении частиц термоэластопласта в состав связующего, вязкость последнего значительно повышается, что в свою очередь ограничивает количество вводимых частиц и соответственно эффект повышения вибропоглощающих свойств может быть не достигнут.

В связи с вышесказанным важно также, чтобы используемый термоэластопласт не вступал в реакцию с матрицей армирующего слоя, в противном случае это приведет к снижению жесткости, прочности, демпфирующих свойств и температуры стеклования конечного композита.

Японской компанией Kugaгау для использования в составе электронных устройств предлагается ПКМ аналогичной структуры [78], содержащий углеродный армирующий наполнитель, соединяемый с нетканым материалом (в соотношении от 20 до 100 частей на 100 частей

углеродного волокна) из двухкомпонентных волокон на основе эластомера, покрытых термопластичной растворимой или реакционноспособной смолой. Термоэластопласт включает жесткие винил-ароматические блоки с молекулярной массой 2500-60 000 единиц и мягкие диеновые блоки массой от 10 000 до 200 000 единиц. В качестве эластомера предлагается использовать любой полимер, имеющий T_g в области от -40 до +30 °С, например, бутадиен, изопрен, хлоропрен, их блок- и привитые сополимеры. Во время формования происходит расплавление волокон эластомера, т.е. нетканый материал выступает в качестве матрицы конечного ПКМ. Образцы полученного композита сочетают высокие значения демпфирующих свойств - имеют $tg\delta$ при 25 °С и 10 Гц от 0,115 до 0,159 и модуль при изгибе от 6,3-11,5 ГПа, причем, как и стоило ожидать, наибольшим значениям КМП соответствуют наименьшее значение $G_{изг.}$ и наоборот.

Для изготовления элементов обшивки фюзеляжа самолета, а также его силовых элементов фирмой Cytac Technology Corp. разработаны композиционные слоистые материалы [59] имеющие хорошие акустические и демпфирующие свойства, включающие армирующие слои на основе углеволокна и внутренний слой, состоящий из двух различных нетканых материалов (на основе термопластов, термоэластопластов или их смесей), во время отверждения пропитываемые связующим градиентно по толщине. Коэффициент механических потерь ($tg\delta$) при частоте 100 Гц в диапазоне температур от -50 до 20 °С изменяется от 0,0095 до 0,0267. Показано, что благодаря используемому техническому решению площадь области повреждения при испытании на сжатие после удара сократилась с 1853 до 1570 мм².

Фирмой 3M Innovative Properties Company заявлен ПКМ с вибропоглощающим вязкоупругим «элементом», расположенным между конструктивными слоями и соединённым с ними [79]. Также материал может включать один или более барьерных слоев, которые в ряде случаев могут совпадать по составу с внутренним вибропоглощающим. Вибропоглощающий слой может представлять собой различные вибропоглощающие пленки производства фирмы 3M и иметь КМП 0,1÷1,0 при 10 Гц (определенный методом ДТМА), а барьерный слой – выбран из группы полиуретанов, полиэфиров, полиимидов (например, полиимидная пленка KaptonTM производства DuPontFilms), эластомеров, эпоксидов, фторполимеров (Tedlar того же производителя), поликарбонатов или их смесей. Авторами четко не приводится обоснование необходимости применения барьерного слоя между конструктивными и вибропоглощающими слоями. Вероятно, основная цель его использования заключается в защите вязкоупругого вибропоглощающего слоя от воздействия внешних факторов (поскольку заявлено, что данные слои должны быть стойкими к проникновению влаги, газов и различных технических жидкостей, в том числе авиационного топлива), однако его влияние на демпфирующие свойства также не установлено. Композиционные слои предлагаемого ПКМ выполнены из препрега на основе эпоксидного связующего и однонаправленного углеродного волокна производства Toray. Как было

упомянуто выше, материал может быть изготовлен в одну стадию одновременным формованием пакета из слоев препрега и вибропоглощающего вязкоупругого «элемента» или включать предварительную стадию его изготовления посредством соединения вибропоглощающего слоя с одним или несколькими барьерными слоями любым доступным способом (склеивание, ламинирование, термосваривание) с последующим формованием слоистого композиционного материала. Для изготовления ПКМ с внутренним вибропоглощающим и барьерными слоями используются следующие способы: автоклавное формование по режиму при температуре 177-182 °C и давлении 60-70 psi в течение 90 мин. или температуре 177-182 °C и давлении 40-50 psi в течение 120 мин.

Эффект экранирования внутренних слоев слоистого материала от атмосферного старения также используется в изобретении [80] ФГУП «НПП «Прогресс», представляющем собой звуко-, вибро-, теплоизолирующую панель из чередующихся слоев вулканизированной и невулканизированной резины. Невулканизированная резина обладает большой звукопоглощающей способностью, но теряет необходимые физико-механические показатели и не может долго храниться, а вулканизированная резина, имея в своей структуре упругую трехмерную пространственную сетку, обладает высокой эластичностью. В процессе работы при возникновении звуковых колебаний, вибраций и эксплуатационных смещений предлагаемая панель обеспечивает повышенную звукоизоляцию за счет рассеивания и поглощения звуковой волны, падающей на верхний слой вулканизированной резины и прохождения звуковой волны в слой невулканизированной резины, где происходит поглощение звука за счет высоких внутренних механических потерь энергии колебаний.

Также слоистую структуру для интегрирования в состав углепластика заявляют китайские изобретатели из NO 725 RESINSTCHINACSIC (CN102179978) [81]. Предлагаемый элемент с вибропоглощающим слоем на основе акрилового, нитрильного, бутил-каучука (в том числе производства фирмы 3М) толщиной от 0,05 до 0,5 мм располагается между указанными слоями. Наибольшее значение прочности при изгибе (400–450 МПа) имеют образцы, включающие в качестве внешних конструктивных (толщиной 2 мм) высокомодульную стеклоткань с углом выкладки 0/90° (наиболее предпочтительный угол, как уже было показано выше, для придания композиту также демпфирующих свойств). Показано, что в результате интегрирования предлагаемого вибропоглощающего слоя в указанную слоистую конструкцию удается добиться повышения звукоизоляции на 8-15 дБ в диапазоне частот от 10 до 2000 Гц по сравнению с обычными ПКМ.

Как известно, сочетание различных по природе волокон армирующих наполнителей оказывает влияние на прочностные, демпфирующие, массовые показатели ПКМ и их стойкость к удару. Так, ПКМ гибридной структуры для применения в авиации, сочетающий высокие проч-

ностные, демпфирующие свойства и стойкость к удару, предлагается фирмой Teijin Techno Products Ltd [82]. Материал представляет собой расположенные определенным образом слои армирующих наполнителей на основе органических (ароматическое полиэфирное, полиамидное, полиарилатное, полиимидное, ПЭЭК, ПТФЭ волокна) и неорганических (угле-, стекловолокна) волокон, пропитанных связующим (термопласт или реактопласт), причем их соотношение (от 10:90 до 50:50) и порядок расположения слоев оказывают влияние на соотношение вибропоглощающих и прочностных свойств композита.

Аналогичный мультифункциональный композиционный материал, обладающий вибропоглощающими свойствами и стойкостью к удару, предложен в [83]. Заявленный слоистый пластик состоит из слоев на основе неорганического наполнителя и внутренней волокнистой структуры на основе ароматического полиэфира, пропитанных связующим, и имеет симметричную или асимметричную структуру. Разработчики также обращают внимание на определенный порядок расположения слоев ПКМ для получения оптимального соотношения демпфирующих и прочностных свойств. Поверхностная плотность интегрируемой структуры при этом не должна превышать 100 г/м^2 .

Композиционный материал для изготовления виброудароизоляторов, широко используемых для защиты радиоэлектронных блоков и возимой радиоаппаратуры в составе бортовых радиоэлектронных блоков от воздействия вибрации, запатентован ФГУП «НИИ автоматической аппаратуры им. Академика В.С. Семенихина» [84]. Предлагаемый материал имеет тонкую многослойную структуру, состоящую из чередующихся упругих и вязкопластичных слоев: материалом для упругих слоев служат армированные термореактивные полимерные материалы на основе эпоксидных смол, а для вязких слоев – армированные полиуретаны, каучуки либо термореактивные полимерные составы на основе эпоксидных смол (ЭД-20), пластифицированные активным пластификатором (тиокол, фурфуролацетатный мономер). Толщина каждого слоя составляет от 50 до 200 мкм при соотношении толщин упругих и вязкопластичных слоев от 1:1 до 1:1,6 соответственно. Способ получения композиционного материала состоит в совместном прессовании пропитанных соответствующими полимерными составами листов ткани с последующим отверждением указанных составов под давлением $1,5 \text{ кг/см}^2$ при температуре 25°C в течение 24 часов. Полученный ПКМ в зависимости от состава исходных компонентов имеет высокие значения КМП ($0,76 < \text{tg}\delta < 0,91$), но характеризуется незначительными показателями прочности при изгибе – от 338 до 369 МПа.

Таким образом, можно проследить динамику использования в качестве интегрируемых в структуру ПКМ элементов от слоистых структур, полимерных пленок, пористых несущих слоев с пропиткой до препрегов с вибропоглощающими свойствами.

Следует также отметить, что использование внутреннего вибропоглощающего слоя в любом виде неизменно приводит к повышению массы слоистого композита. Исследованию нивелирования данного эффекта посвящена статья [85]. К возможным способам авторы относят расположение вибропоглощающих материалов в области максимальных сдвиговых деформаций образцов, обеспечение монолитности композита, частичное нанесение внутреннего слоя.

Необходимо упомянуть также различные многослойные конструкционные виброшумодемпфирующие панели, в основном представленные отечественными исследователями (ГОУ ВПО «Тольяттинский Государственный Университет», ФГУП «ЦНИИМ «Прометей», ФГУП «Акустический институт им. Н.Н. Андреева, ГОУ ВПО «МГУЛ»), используемые для изготовления корпусных элементов производственно-технологического оборудования, энергетических установок, транспортных машин, систем вентиляции и отопления, кондиционирования, обладающих улучшенными виброакустическими характеристиками.

Например, в работе [86] описана композитная структура, содержащая тонколистовую панель и смонтированную на ее поверхности армированную виброшумодемпфирующую прокладку, при этом с одной из сторон армирующий слой превышает габаритные размеры вязкоэластичного слоя. Последний может быть выполнен из битума, в том числе содержащего наполнитель, битумно-полимерной композиции, ПВХ, полибутадиена и других каучуков и представляет собой обособленные полосы, разнесенные между собой с образованием воздушных зазоров. Коэффициент перфорации поверхности композитной структуры составляет 0,1. Технический результат, достигаемый при использовании заявляемого технического решения, заключается в том, что за счет выполнения соответствующим образом практически исключается относительное свободное смещение композитной структуры относительно вибрирующей поверхности панели, интенсифицируется механизм преобразования механической вибрационной энергии в необратимым образом рассеиваемую при этом тепловую энергию. За счет этого может быть снижен удельный поверхностный вес и соответственно стоимость предлагаемой структуры путем уменьшения толщины вязкоэластичного и/или армирующего слоя. Но, поскольку в качестве вязкоэластичного слоя используется битумная основа или полимерные материалы общего назначения, диапазон рабочих температур ограничен интервалом +30...+80 °С.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Объекты исследований

Для разработки вибропоглощающего материала на рабочую температуру 180 °С были выбраны материалы, свойства которых приведены в таблице 2.1.1:

Таблица 2.1.1 - Свойства исходных материалов для изготовления экспериментальных образцов вибропоглощающего материала с $T_{\text{раб.}} 180\text{ }^{\circ}\text{C}$

Материал	Толщина, мм	$P, \text{ г/м}^2$	Горючесть		
			$\tau_{\text{ост}}, \text{ с}$	$h_{\text{прог}}, \text{ мм}$	категория
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО полотняного переплетения с водоотталкивающей пропиткой	0,25	165	0	20	трудносгорающий
Ткань СВМ арт.86-130-02 атласного переплетения, суровая,	0,5	350	0	10	трудносгорающий
Стеклоткань Т-10-14	0,2	290	2-3	5-8	самозатухающий
Арселоновая ткань 1С144	0,6	330	60	290	сгорающий
Материал нетканый из волокна Арселон	4	290	6	25	самозатухающий
Материал нетканый армированный из волокна Арселон	2	420	6	70	самозатухающий
Материал нетканый из волокна СВМ марки АОМ	2	170	8	13	самозатухающий
Материал нетканый из волокна СВМ марки НТМ-А	4	280	0	10	трудносгорающий
Пленка из сополимера тетрафторэтилена с гексафторпропиленом	0,05	110	0	85	трудносгорающий
	0,10	220	0	75	

Свойства стеклотканей для опробования в качестве армирующего наполнителя конструкционных слоев ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем приведены в таблице 2.1.2, основные физические свойства исходных компонентов, в том числе препрегов для изготовления конструкционных слоев ПКМ – в таблице 2.1.3.

Таблица 2.1.2 - Краткая характеристика стеклотканей

Марка	Толщина, мм	Поверхностная плотность, г/м ²	Разрывная нагрузка основа, Н/кг	Разрывная нагрузка уток, Н/кг
T-10-14	0,23	290	2940	1568
T-15 (П)-76	0,19	160	758	589
T-64 (ВМП)-78	0,085	95	882	490
T-60/2 (ВМП)-14	0,22	215	3136	-

В качестве матрицы конструктивных слоев ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем опробованы клеевая пленка ВК-51 (ТУ 1-596-212-85) и клеевое связующее ВСК-14-6. Клеевая пленка марки ВК-51 имеет эпоксидную основу, поверхностную плотность 265...325 г/м², интервал рабочих температур -60...+80 °С, предназначена для склеивания конструкций из металлов и ПКМ, в том числе сотовых конструкций с неперфорированным наполнителем, прочность при сдвиге клеевого соединения при температурах 20 и 80 °С соответственно 35,3 и 27,7 МПа.

Клеевое связующее марки ВСК-14-6 пониженной горючести с теплостойкостью 80 °С представляет собой полимерную композицию на основе модифицированных эпоксидных смол и предназначено для изготовления клеевых препрегов на основе стекло- и угленарполнителей и композиционных материалов клеевых на их основе, работающих в интервале температур от минус 60 до плюс 80 °С.

Таблица 2.1.3 - Основные физические свойства исходных компонентов для изготовления ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем

Компонент	Назначение	Поверхностная плотность, г/м ²	Толщина, мм
Пленка ВПС-2,5	Внутренний вибропоглощающий слой	630	0,60
Пленка Витур Т0533-90С		600	0,55
Клеевая пленка ВК-51	Связующее конструктивных слоев	280	0,25
Препрег на основе связующее/наполнитель	Конструктивные слои разрабатываемого ПКМ		
ВСК 14-6/Т-10		455	0,31
ВСК 14-6/Т-60		340	0,25
ВСК 14-6/Т-64		179	0,17
ВСК-14-6/Т-15		270	0,30

В качестве исходных компонентов для изготовления экспериментальных образцов звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем были выбраны следующие материалы:

- для обшивок сэндвич-панели - клеевой препрег марки КМКС-2.120.T10.37 (далее, препрег марки КМКС) на основе конструкционной стеклоткани Т-10-14 и эпоксикаучукового связующего;
- «сердечник» трехслойной конструкции выполнен из полимерных сот – стеклосотопласта марки ССП-1-8Т высотой 2 см;
- вибропоглощающий слой – из пленки марки Витур Т0533-90С на основе термопластичного полиуретана толщиной 0,4 мм.

Марка препрега подбиралась таким образом, чтобы температурный режим отверждения связующего не превышал температуру деструкции вибропоглощающего слоя.

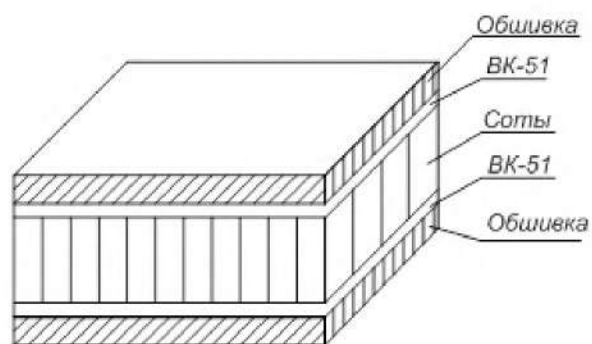
Для соединения сотового заполнителя с обшивками использован эпоксидный пленочный клей марки ВК-51.

Технологический процесс изготовления экспериментальных образцов композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели является ступенчатым и включает предварительную стадию прессования обшивок.

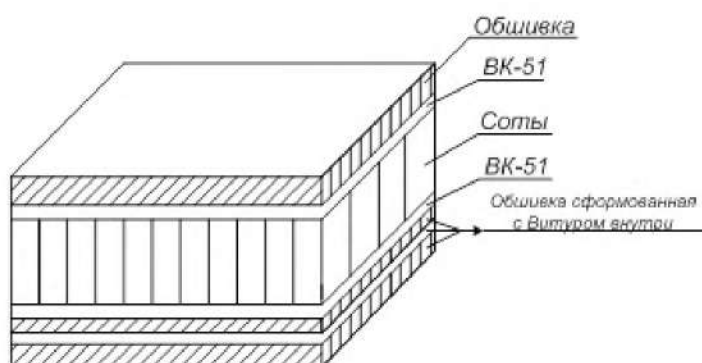
Экспериментальные образцы композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели имели следующие варианты состава и структуры:

- классическая трехслойная конструкция, включающая два слоя обшивки из стеклопластика и расположенный между ними сотовый заполнитель из стеклосотопласта (вариант (а));
- трехслойная конструкция, включающая два слоя обшивки из стеклопластика, одна из которых содержит интегрированный вибропоглощающий слой, и расположенный между ними сотовый заполнитель из стеклосотопласта (вариант (б));
- трехслойная конструкция, включающая два слоя обшивки из стеклопластика, расположенный между ними сотовый заполнитель из стеклосотопласта и вибропоглощающий слой, находящийся между «сердечником» и одной из обшивок (вариант (в)).

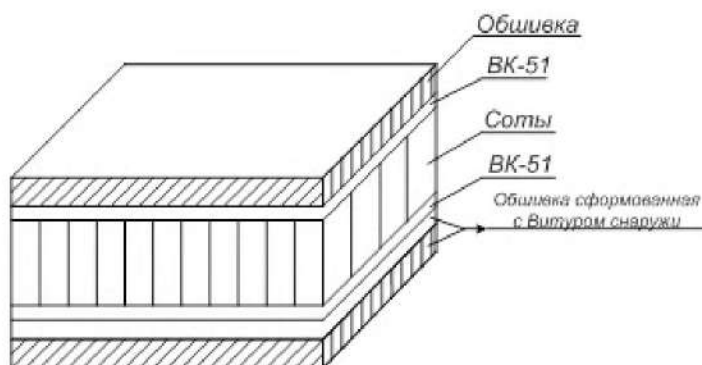
Схематичное изображение экспериментальных образцов композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели приведено на рисунке 2.1.1.



вариант (а)



вариант (б)



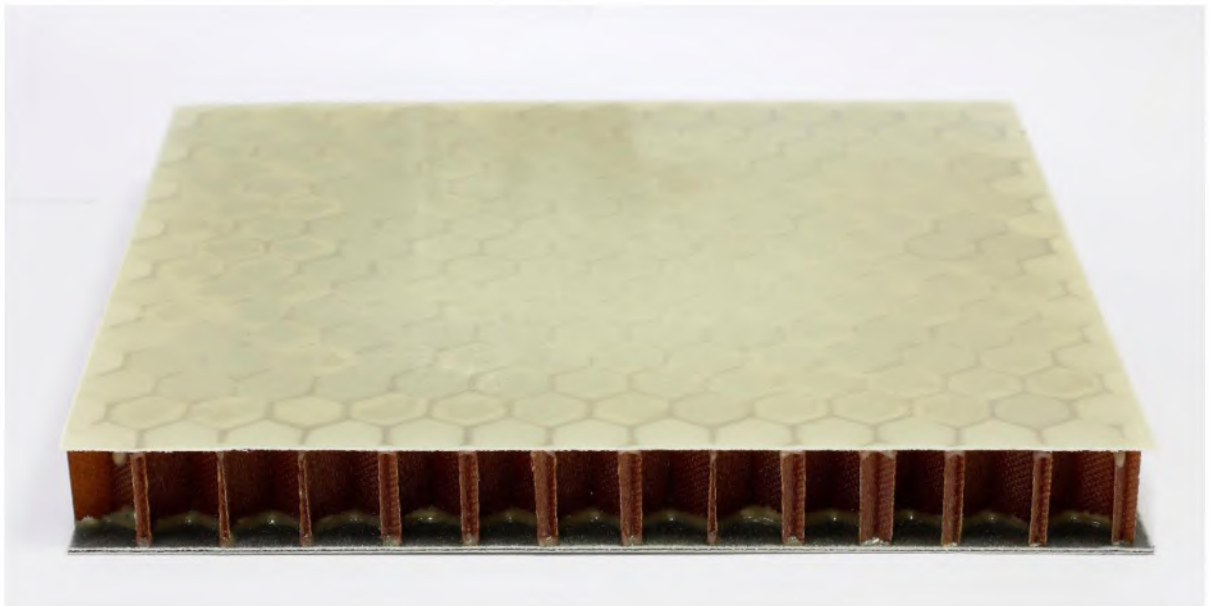
вариант (в)

Рисунок 2.1.1 - Схематичное изображение структуры экспериментальных образцов композитной звукотеплоизолирующей сэндвич-панели.

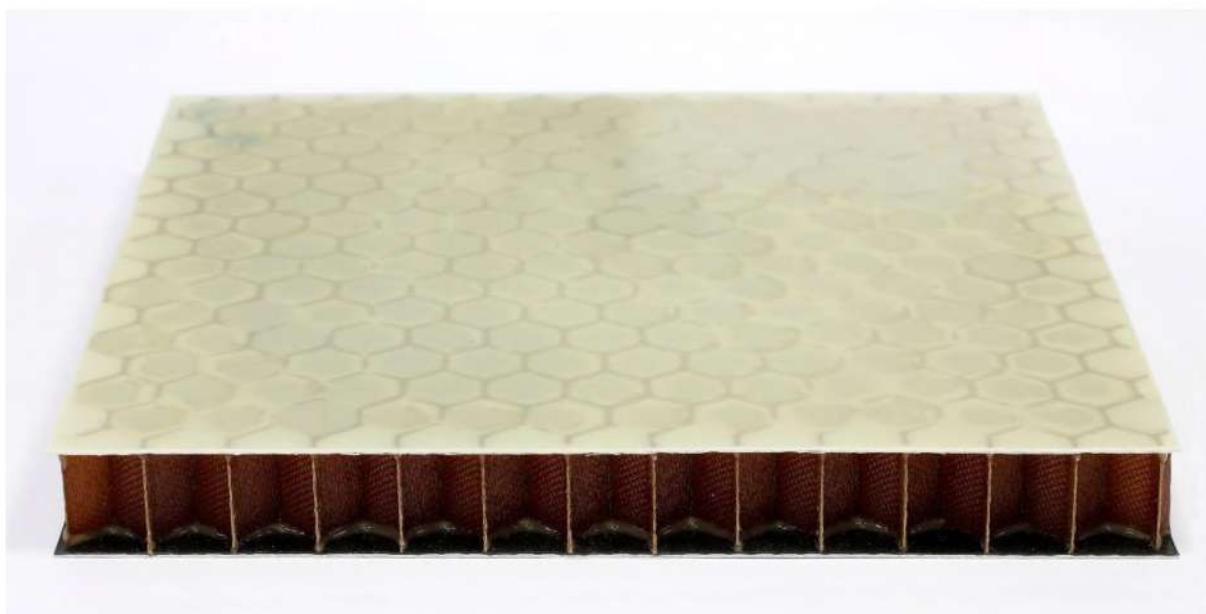
Внешний вид изготовленных экспериментальных образцов композитной звукотеплоизолирующей сэндвич-панели приведен на рисунке 2.1.2.



(a)



(6)



(в)

Рисунок 2.1.2 - Экспериментальные образцы композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели: (а) – образец, не содержащий вибропоглощающий слой; (б) – образец с вибропоглощающим слоем, интегрированным во внутреннюю структуру одной из обшивок; (в) – образец с вибропоглощающим слоем, расположенным между «сердечником» и одной из обшивок.

Таблица 2.1.4 - Различные варианты рецептуры модифицированной композиции на основе Витур Т-0533 и УНТ

Концентрация УНТ в смеси, масс. %	Концентрация суперконцентрата (СК) в смеси, %	Рецептура на 110 г готовой смеси
0,09	3	3,3 г СК + 106,7 г Витур-Т-0533-90С
0,54	18	19,8 г СК + 90,2 г Витур-Т-0533-90С
1,00	30	33 г СК + 77 г Витур-Т-0533-90С

Объектами исследования по влиянию УНТ на свойства вибропоглощающего слоя на основе термопластичного полиуретана являлись образцы пленок, полученных в результате экструзии композиций модифицированного состава на основе термопластичного полиуретана марки Витур Т-0533-90С и УНТ марок Tubeall и Таунит-М отечественного производства. Для получения 100 г модифицированной композиции на

основе Витур Т-0533 и УНТ было выбраны 3 концентрации с учетом коэффициента запаса 1,1.

Объектами исследования для изготовления многослойного армированного вибропоглощающего материала с улучшенными упруго-массовыми характеристиками были экспериментальные образцы пяти вариантов состава:

Вариант №1 - двухслойный, включающий вибропоглощающий слой толщиной 2,0 мм и армирующий слой толщиной 0,5 мм;

Вариант №2 - четырехслойный, включающий два вибропоглощающих слоя толщиной 1,0 мм, чередующихся с двумя армирующими слоями толщиной 0,3 мм;

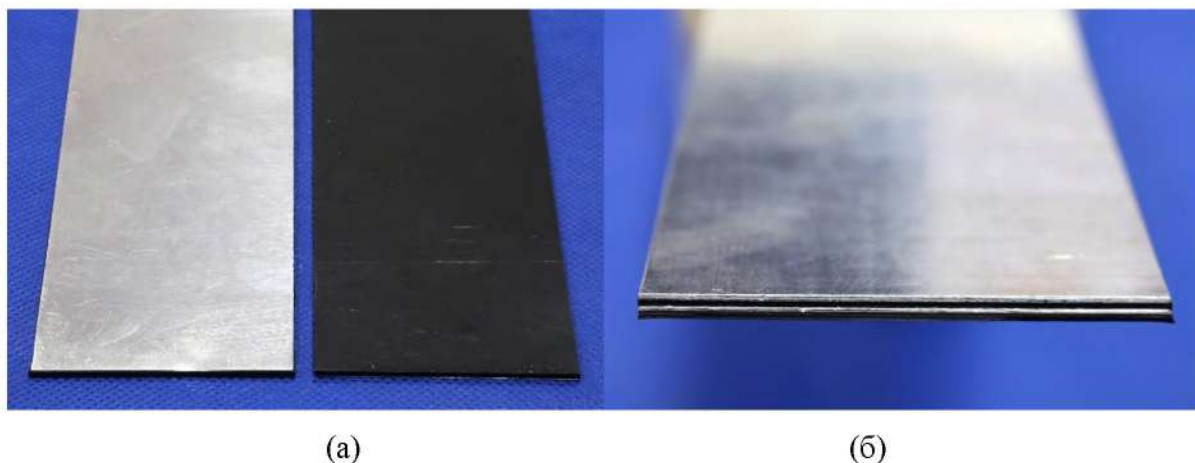
Вариант №3 - восьмислойный, включающий четыре вибропоглощающих слоя толщиной 0,5 мм, чередующихся с четырьмя армирующими слоями толщиной 0,1 мм;

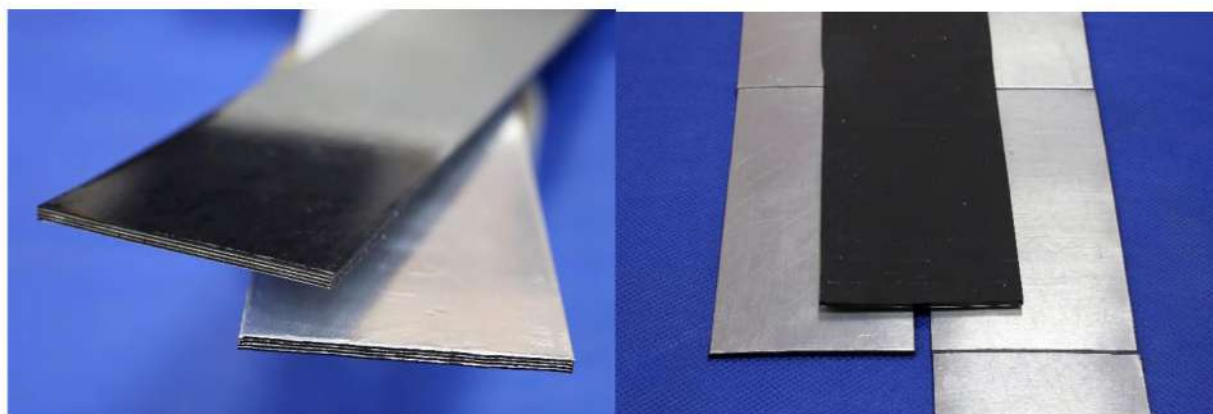
Вариант №4 - двухслойный, включающий вибропоглощающий слой толщиной 2,0 мм и армирующий слой толщиной 0,5 мм с разрезанным на три равные части армированием;

Вариант №5 - двухслойный, включающий вибропоглощающий слой толщиной 2,0 мм и перфорированный армирующий слой толщиной 0,5 мм.

В качестве вибропоглощающего слоя экспериментальных образцов был выбран листовой термоэластопласт марки ВТП-1В на основе термопластичного полиуретана, для армирующего слоя использовались фольга А5М и лист Д16.

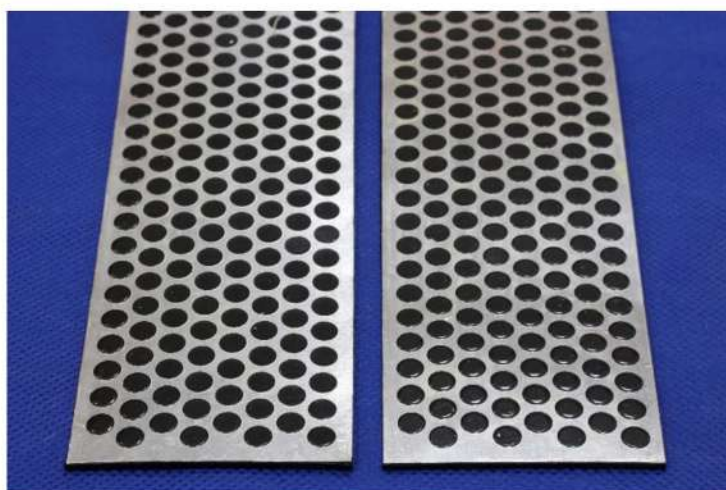
Внешний вид экспериментальных образцов приведен на рисунке 2.1.3.





(в)

(г)



(д)

Рисунок 2.1.3. Внешний вид образцов многослойного армированного вибропоглощающего материала с улучшенными упруго-массовыми характеристиками: вариант №1 (а), вариант №2 (б), вариант №3 (в), вариант №4 (г), вариант №5 (д).

Для продолжения работ по исследованию армированного ВПП с различной степенью перфорации армирующего и вибропоглощающего слоев в качестве базового состава был использован вариант состава №5 (рис. 2.1.3 (д)), включающий вибропоглощающий слой толщиной 2,0 мм и перфорированный армирующий слой толщиной 0,5 мм с процентом перфорации $\approx 47\%$ (от площади листа).

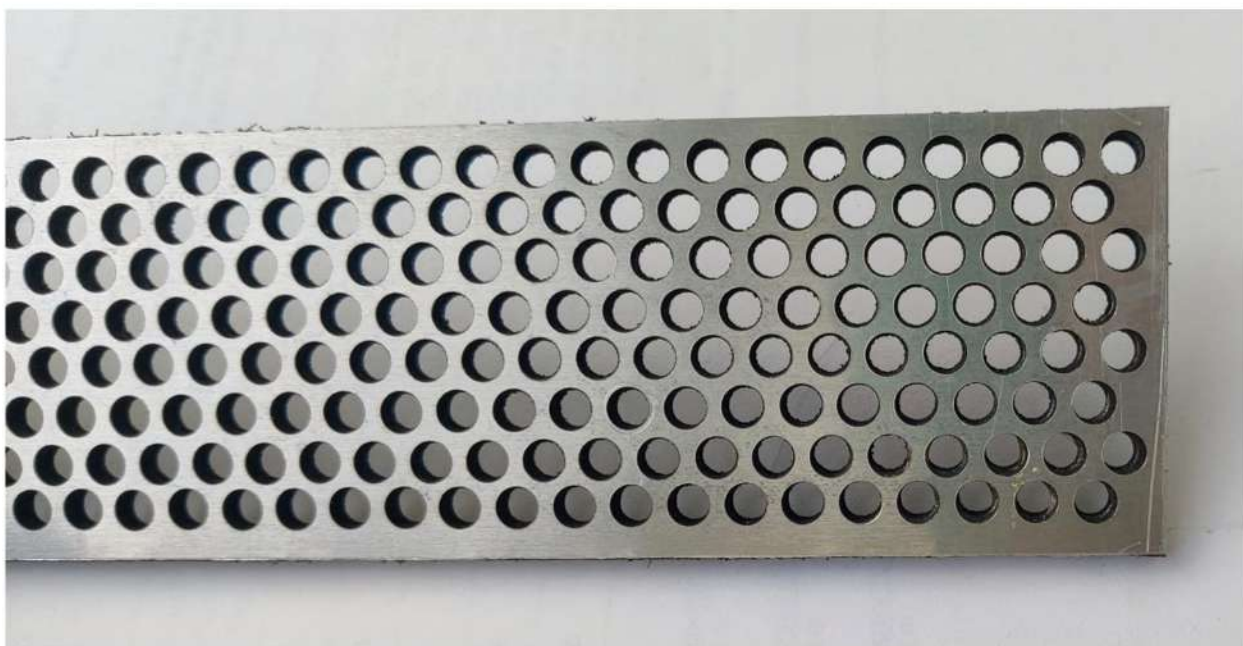
Для изготовления вибропоглощающего слоя использовался листовой термоэластопласт марки ВТП-1В на основе термопластичного полиуретана толщиной 2,0 и 4,0 мм, в качестве армирующего слоя был выбран лист из алюминиевого сплава марки Д16-АТ толщиной 0,5 мм.

Степень перфорации слоев определяется диаметром и количеством перфорирующих отверстий и в эксперименте составляла 25 и 50%. За базовый был принят диаметр отверстий 6 мм, при количестве отверстий 352 шт. на образец, обеспечивающий степень перфорации 50%. Для изготовления образцов со степенью перфорации 25%

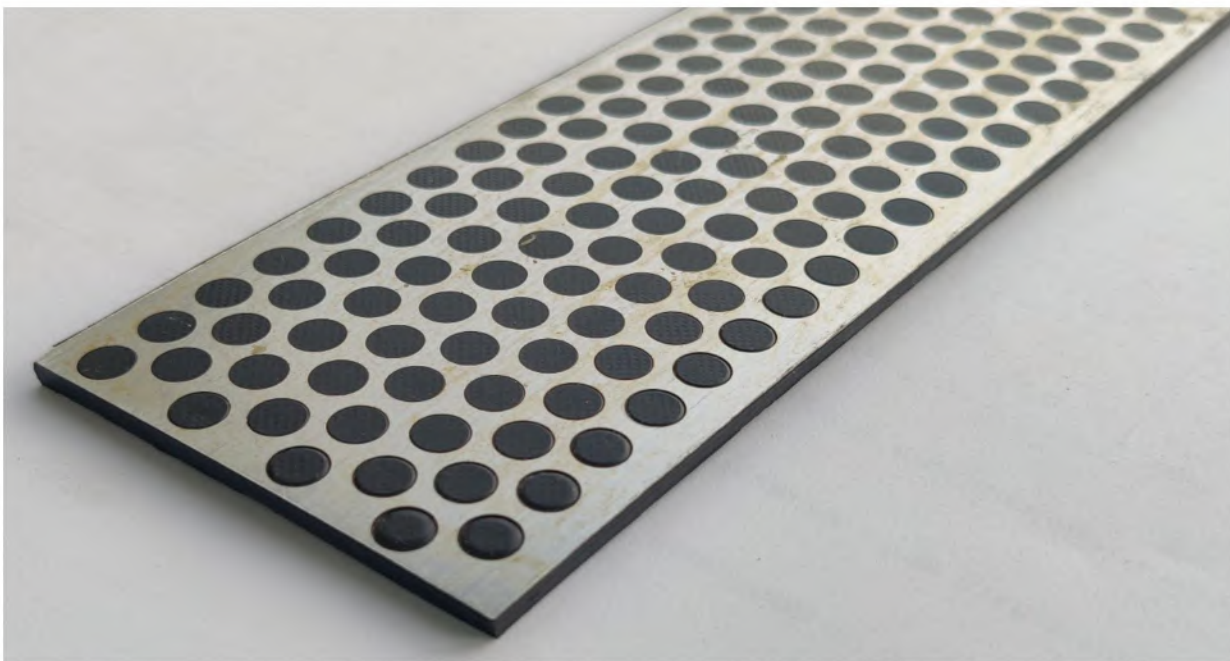
площадь каждого из них была уменьшена в 2 раза, что соответствует диаметру 4,2 мм.

Четыре из шести вариантов состава экспериментальных образцов ВПП были изготовлены со сквозной перфорацией слоев, т.е. содержали перфорированные вибропоглощающий и армирующий слои. Для исследования влияния степени перфорации слоев на свойства ВПП также были изготовлены экспериментальные образцы АВПМ классического состава и образцы с перфорацией только вибропоглощающего слоя.

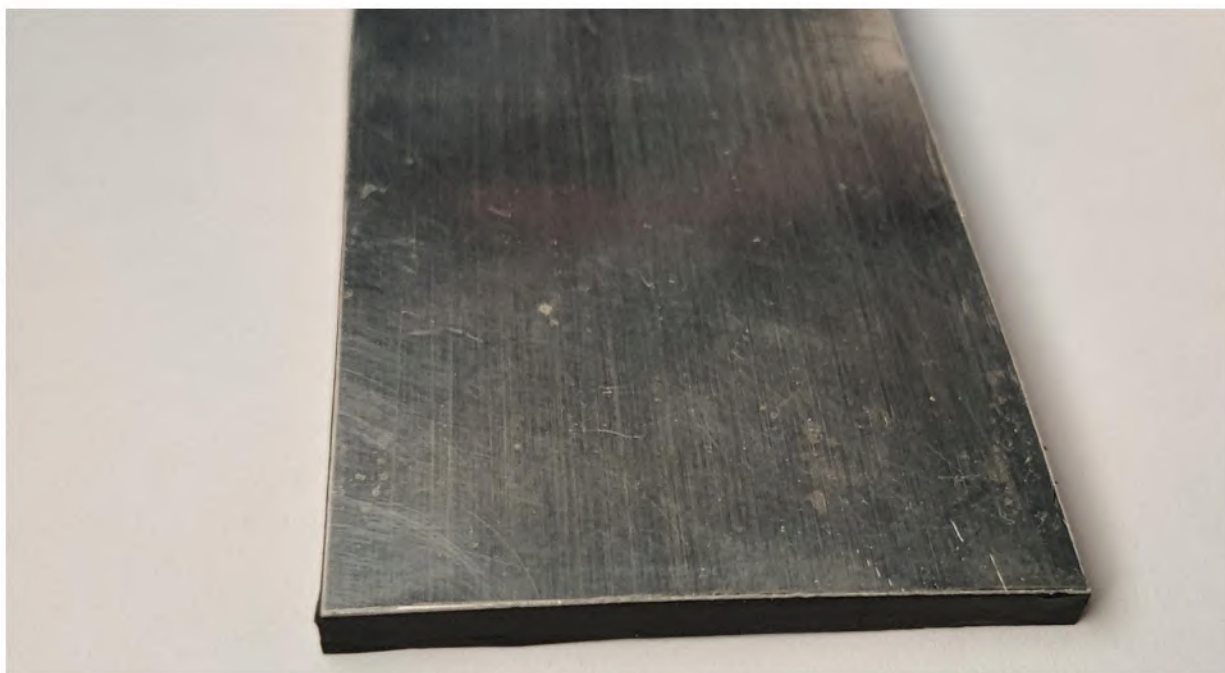
Внешний вид изготовленных экспериментальных образцов нескольких вариантов состава (отличающихся от аналогов толщиной ВПС или степенью перфорации слоев) приведен на рисунке 2.1.4.



(a)



(б)



(в)

Рисунок 2.1.4. Внешний вид экспериментальных образцов ВПП: (а) - вариант состава №5, (б) - вариант состава №6, (в) – вариант состава №3.

2.2. Методы исследований

Определение вибропоглощающих и термодинамических характеристик в диапазоне частот и температур

Тангенс угла механических потерь ($\text{tg}\delta$), комплексный модуль (E^*) и его компоненты модуль упругости (E'), модуль потерь (E''), температура стеклования (T_g) определялись методом динамического механического анализа (ДМА) в соответствии с СТО 1-595-36-464-2015 «Методика определения температуры стеклования полимерных композиционных материалов (ПКМ) с использованием динамического механического анализа», который соответствует международным стандартам ASTM D 7028-07e1, ASTM E1142; ASTM D4065; ASTM E1640 (метод А) и ISO 6721-1 (метод Б).

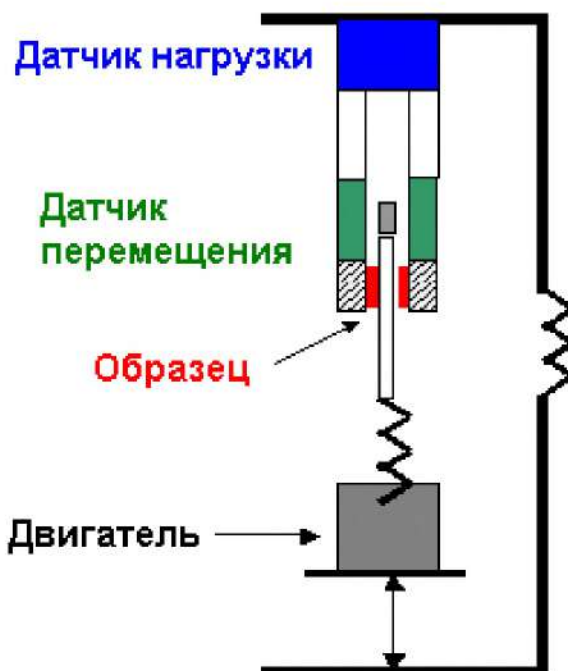


Рисунок 2.2.1. Схематическое изображение принципа действия прибора ДМА.

Принцип измерения ДМА заключается в приложении периодически изменяющейся нагрузки к исследуемому образцу определенной геометрической формы при непрерывном нагреве с заданной скоростью и измерении амплитуды результирующей деформации. В результате фиксируется изменение модуля упругости, тангенса угла механических потерь и модуля потерь в зависимости от температуры. При задержке между сигналами нагрузки и деформации вычисляют угол фазового сдвига.

Ввод исходных данных и регистрация результатов измерения осуществляется на персональном компьютере с установленным программным обеспечением. Минимальный набор выходных сигналов, необходимых для проведения измерений методом ДМА, включает в себя значение деформации, силы, температуры и времени.

Модуль упругости рассчитывается из амплитуд нагрузки и смещения, F_a и L_a , и фазового сдвига между ними δ (см. рис. 2.2.3):

- комплексный модуль упругости M^* (модуль упругости при растяжении – модуль Юнга, E^* , и модуль упругости при сдвиге G^*);
- динамический модуль упругости (модуль накопления) M' пропорционален запасенной и высвобождаемой упругой энергии;
- модуль потерь M'' пропорционален преобразованной в тепловую и потерянной энергии;
- тангенс угла механических потерь ($\tan \delta$).

Модули упругости рассчитываются по измеренной жесткости по следующим уравнениям:

$$|M^*| = S \cdot g = \frac{F_a}{L_a} g \quad S = \frac{F_a}{L_a}$$

$$M' = |M^*| \cos \delta \quad M'' = |M^*| \sin \delta \quad \tan \delta = \frac{M''}{M'}$$

, где

g – геометрический фактор образца, определяемый из его размеров,

S – жесткость образца.

Исследование диссипативных свойств экспериментальных образцов вибропоглощающих материалов проводили на динамическом механическом анализаторе и термоанализаторе динамическо-механической модификации фирмы Netzsch DMA 242 C.

Исследования проводились в двух режимах деформации – сдвига и трехточечного изгиба с закрепленными концами. Во втором случае образец располагался на двух призматических опорах, переменная нагрузка прикладывалась к его середине посредством подвижной призматической опоры.

Исследование коэффициента механических потерь образцов проводили в различных диапазонах температур (скорость нагрева 3 °C/мин.) и частот, в статических режимах - при температуре 23 °C и частоте 100 Гц соответственно.

Образцы для исследования в режиме сдвига представляли собой диски диаметром 10 мм. Образцы для исследования в режиме трехточечного изгиба наклеивались на

подложку из алюминиевого сплава Д16-АТ размерами 80x10x1 мм. Склеивание проводилось различными клеями, например, ВКР-27, соединение с подложкой осуществлялось со стороны вибропоглощающего слоя.

Каждое исследование проводилось с использованием трех образцов, в данной работе представлены средние арифметические значения.

Так, исследование демпфирующих свойств образцов ТПУ с УНТ проводили на термоанализаторе динамическо-механической модификации фирмы Netzsch DMA 242 C (в статической воздушной среде) в условиях трехточечного изгиба в диапазоне температур от -60 до +80 °С (скорость нагрева 3 °С/мин) и при частоте 100 Гц.

Термический анализ проводили в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ Р 56755-2015 «Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК). Определение характеристических температур и времени по кривым реакции, определение энтальпии и степени превращения», ММ 1.595-11-414-2010 «Определение температур и тепловых эффектов релаксационных и фазовых переходов, параметров химических реакций», ГОСТ Р 56721-2015 «Термогравиметрия полимеров». Общие принципы» (определение потери массы при динамическом нагреве от 25 до 1000 °С).

Электронная микроскопия

Для исследования микроструктуры композита на границе раздела фаз вибропоглощающего и конструкционных слоев были изготовлены микрошлифы. Исследование микрошлифов проводили на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 10 при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка 200 пА в режиме вторичных электронов при увеличении $\times 10$ – $\times 100$.

Неразрушающий контроль

Для определения наличия дефектов образцов (расслоение, наличие пор) был проведен неразрушающий контроль на дефектоскопе ультразвуковом УСД-60 по ММ 1.2.165-2015 «Акустический контроль деталей из ПКМ мотогондолы двигателя» теневым методом путём сканирования преобразователями по всей площади образца.

Теплопроводность определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме».

Линейные размеры определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 17035-86 «Методы определения толщины и пленок листов».

Массу 1 м² (поверхностную плотность) определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 17073-71 «Методы определения толщины и массы 1 м²».

Плотность определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 15136-69 «Пластмассы. Метод определения объемной плотности (объемной массы)».

Водопоглощение определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 4650-2014 «Пластмассы. Методы определения водопоглощения». Испытание проводилось в течение 24 часов и 30 суток.

Влагопоглощение определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 56762-22015 «Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния». Испытание проводилось в течение 24 часов и 30 суток.

Прочность при растяжении и относительное удлинение при разрыве определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 11262-2017 (ISO 527-2:2012) «Метод испытания на растяжение».

Прочность связи с металлом (прочность при отслаивании) определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 411-77 «Методы определения прочности связи с металлом при отслаивании».

Прочность связи между слоями при расслоении (межслойную адгезию) определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 6768-75 «Резина и прорезиненная ткань. Метод определения прочности связи между слоями при расслоении». Испытания проводились на образцах шириной 25 мм при скорости 100 мм/мин.

Прочность при изгибе при 20 °С определяли по ГОСТ 25.604-82 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах».

Горючесть определяли в соответствии с порядком измерений, приведенном в ГОСТ 1.90094-79 «Полимерные материалы. Метод определения горючести декоративно-отделочных и конструкционных полимерных материалов» и Авиационных правил АП-25 часть I Приложение F.

Определение акустических характеристик

Исследование акустических характеристик (звукоизоляции или коэффициента потерь при прохождении акустической волны через образец и звукопоглощения или поглощения акустических волн) проводили согласно СТО 1-595-19-384-2007 «Исследование неметаллических материалов на акустическом комплексе четырехмикрофонным методом» и с использованием двухмикрофонного метода в соответствии с ОСТ 190435-2007 «Неметаллические материалы. Определение

характеристик поглощения и отражения акустических волн в диапазоне частот от 50 до 6400 Гц».

Коэффициент звукоизоляции определяет уровень снижения звукового давления при прохождении волны сквозь преграду, в то время как поглощение звука связано со снижением энергии отраженной звуковой волны при взаимодействии с преградой в результате ее рассеивания, перехода в тепло.

Испытания в составе колесного вездехода «РУСАК» 4x4

В соответствии с СТО 1-595-19-385-2013 «Проведение исследований с использованием интенсиметрического зонда» (определение интенсивности звуковой волны) и ГОСТ 53490-2009 «Тракторы сельскохозяйственные. Шум на рабочем месте оператора. Методы и условия измерений» проведено измерение уровня шума в транспортном средстве (колесный вездеход Русак, далее - ТС) до и после установки комплекса вибропоглощающих материалов марок ВТП-1В, ВТП-3В, ВТП-4В, СВПМ-А.

На основании полученных частотных зависимостей был рассчитан общий уровень шума до и после установки ВПМ в конструкции колесного вездехода Русак:

$$L_{1/1} = 10Lg\left(10^{L_{1/3}^1/10} + 10^{L_{1/3}^2/10} + \dots + 10^{L_{1/3}^n/10}\right)$$

Данные расчетов приведены в таблице 4.19 раздела 4.4.

Таблица 2.2.1. Узлы размещения вибропоглощающих материалов в конструкции колесного вездехода Русак.

Марка ВПМ	Узел размещения
ВТП-1В $\delta=2,0$ мм	потолок
ВТП-1В $\delta=4,0$ мм	пол
ВТП-3В	потолок, обечайка держателя глушителя
ВТП-4В	силовые элементы рамы, внешняя часть крышки двигательного отсека
СВПМ-А	внутренняя поверхность крышки двигательного отсека

Испытания проводились на 1-3 и 5 передачах при оборотах двигателя 1500, 2000, 2500 и 3000 об/мин., в девяти точках, расположенных внутри салона ТС (см. рис. 2.2.4).

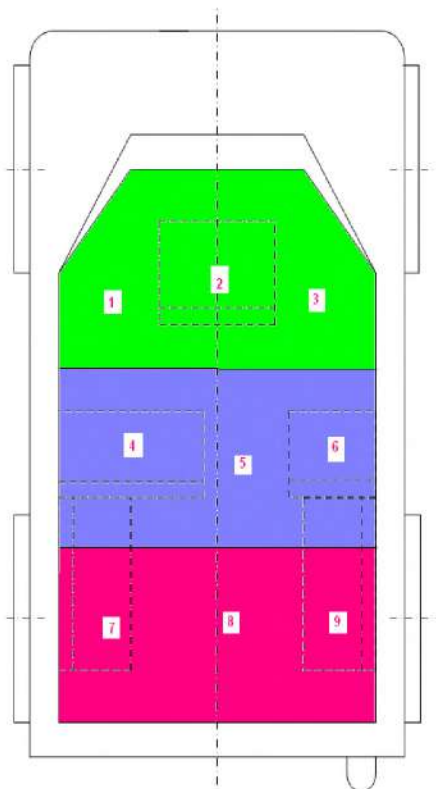


Рисунок 2.2.2. Схематичное изображение колесного вездехода Русак с тремя зонами и соответствующими точками измерения интенсивности звуковой волны.

Технология введения УНТ в матрицу термопластичного полиуретана марки Витур Т-0533-90С включала следующие стадии:

- приготовление суперконцентрата из гранул термопластичного полиуретана марки Витур Т-0433-85, не содержащего сажевого наполнителя;
- введение суперконцентрата в матрицу ТПУ марки Витур Т-0533-90С в процессе экструзии;
- изготовление пленки из гранулята модифицированной композиции в процессе экструзии.

Для введения в матрицу Витур Т-0533-90С был приготовлен 3% суперконцентрат на основе гранулята из ТПУ марки Витур Т-0433-85 и УНТ. Изначально был приготовлен раствор из ТПУ марки Витур Т-0433-85 в ДМФА, концентрация которого в процессе работы была снижена на 5% из-за высокой вязкости, что могло бы помешать дальнейшему введению и диспергированию УНТ при помощи ультразвукового гомогенизатора.

В процессе обработки ультразвуком вязкость раствора сильно повысилась, что

сопровождалось сильным нагревом стержня гомогенизатора и ухудшало качество диспергирования. Это потребовало дополнительного введения растворителя ДМФА и снижения концентрации исходного раствора.

После охлаждения стержня гомогенизатора обработка ультразвуком была проведена повторно, и также сопровождалось повышением вязкости раствора. Очевидно, что это явление связано не только с испарением растворителя, но и с введением в раствор УНТ, которые, как можно предположить, выступают в качестве активного наполнителя.

Полученный после ультразвуковой обработки раствор был осажден в емкость с холодной водой при активном перемешивании на верхнеприводной мешалке. В результате были получены агломераты в виде сгустков полимера, которые после измельчения и сушки в термошкафу в течение соответствующего времени для полного удаления растворителя, были подвергнуты переработке на двухшнековом экструдере при определенных параметрах переработки.

Полученный в результате экструзии гранулят суперконцентрата также был подвергнут сушке в течение определенного времени.

Процесс введения суперконцентрата в Витур-Т-0533-90С проводили на одношнековом экструдере в два этапа для улучшения диспергирования, с промежуточной сушкой полученных смесей в течение не менее 12 ч.

Полученный гранулят из модифицированных композиций Витур был проэкструдирован на одношнековом экструдере с плоскошелевой головкой при соответствующих параметрах переработки. Толщина полученной в результате экструзии пленки составляла 0,90-1,00 мм.

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наиболее перспективной структурой вибропоглощающих материалов (ВПМ) является многослойная – сочетающая либо разнообразные по назначению и составу слои, либо чередующиеся полимерные пленки, усиленные армирующими слоями. Материалы подобного состава и строения имеют ряд преимуществ перед однослойными покрытиями: обладают повышенными вибропоглощающими свойствами за счет содержания нескольких вибропоглощающих слоев или наличия армирующего слоя, имеют широкий диапазон вибропоглощения благодаря сочетанию полимерных материалов с различной температурой стеклования, а также различные функциональные свойства (звукопоглощающие, звукоизоляционные, теплопроводящие) за счет дополнительных слоев полимерных материалов.

Проведены исследования по выбору компонентов для создания вибропоглощающего слоя.

3.1. Выбор вибропоглощающего слоя

3.1.1 Исследования свойств полимерных пленок для создания вибропоглощающего слоя

Из имеющегося опыта работы известно, что в качестве вибропоглощающего слоя ВПМ часто используются полимерные материалы на основе термопластов. Например, в состав материала ВТП-1В и армированных вибропоглощающих материалов марок ВТП-4В, ВТП-1В-А, ВТП-1ВД входят полимерные пленки и материалы на основе термопластичного полиуретана, а материала марки ВТП-2В и различных слоистых конструкций типа «сэндвич» судостроительного назначения – на основе поливинилацетата. Также имеются сообщения о применении для указанных целей полиэтилена и его сополимеров, фторопласта, сложных полиэфиров, поливинилхлорида, полибутилметакрилата, каучуков, различных резин и битумов [8].

В данной работе в качестве вибропоглощающих слоев для внедрения в структуру слоистого пластика использованы пленки из термопластичного полиуретана (ТПУ) марок Витур-0433, Витур Т-0533-90С и модифицированного поливинилацетата (ПВА) марки ВПС-2,5. Свойства указанных материалов приведены в таблице 3.1.

Из полученных результатов видно, что листовой термоэластопласт марки ВитурТ-0533-90С имеет более высокие показатели прочности и относительного удлинения при разрыве по сравнению с материалом Витур Т-0433-85С. Оба материала толщиной 0,5 мм имеют более низкое разрывное удлинение ($\varepsilon_p=270-290\%$) по сравнению с материалами толщиной 1,0 и 1,5 мм, что свидетельствует о большей степени вытяжки тонкого листа в процессе его экструзии. Поливинилацетатная пленка ВПС-2,5 имеет низкую прочность ($\sigma_p=1,8$ МПа) и

высокое относительное удлинение при разрыве ($\varepsilon_p=780$ %). Поверхностная плотность исследованных материалов в зависимости от толщины находится в пределах (0,55-1,60) кг/м², что дает возможность комбинировать их с другими слоями с различным сочетанием толщин. Из полученных данных также следует, что с увеличением толщины материала Витур Т-0533-90С его равновесное водо- и влагопоглощение снижается.

Таблица 3.1 – Физические и механические свойства материалов для вибропоглощающих слоёв

Марка материала	Толщина, мм	Поверхностная плотность, кг/м ²	σ_p , МПа	ε_p , %	Влаго/водопоглощение*, %
Витур Т-0533-90С	0,5	0,55	44,1	290	1,75/1,60
	1,0	1,10	45,3	600	1,69/1,70
	1,5	1,60	47,6	660	1,50/1,79
	2,0	2,10	34,0	570	1,40/1,48
	4,0	4,20	35,3	720	1,30/1,37
Витур Т-0433-85С	0,5	0,55	34,8	270	-
	1,0	1,10	36,3	390	-
	1,5	1,60	38,7	450	-
ВПС 2,5	0,6	0,75	1,8	780	-

*приведены равновесные значения

Основным параметром, характеризующим способность материалов к поглощению вибрационной энергии, является тангенс угла механических потерь ($\operatorname{tg}\delta$). Максимальные потери механической энергии ($\operatorname{tg}\delta_{\max}$) в полимерах наблюдаются в области перехода из стеклообразного состояния в высокоэластичное. Результаты термического анализа исходных вибропоглощающих слоев из термоэластопластов и термопласта приведены в таблице 3.2.

Температура стеклования определялась двумя методами: методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) со скоростью нагрева 5 °С/мин. и методом динамического механического анализа (ДМА) при сдвиговом нагружении образца при частотах 1 и 100 Гц. Температура деструкции определялась методом термогравиметрического анализа (ТГА) по изменению массы образца от температуры при скорости нагрева 10 °С/мин и ДСК.

Из приведенных в таблице 3.2 данных видно, что температура стеклования зависит от состава материала и метода испытания. При испытании образцов методом ДМА наблюдается зависимость T_g от частоты, что соответствует принципу температурно-временной суперпозиции. При увеличении частоты от 1 до 100 Гц температура стеклования материала Витур Т-0533-90С повышается с -40 до -35 °С, материала Витур Т-0433-85С - с -49 до -44 °С, поливинилацетатной пленки ВПС-2,5 - с -2,6 до 4,6 °С.

Таблица 3.2 - Температуры стеклования и разрушения исходных вибропоглощающих слоев

Марка материала	Температура стеклования, °С			Температура начала деструкции, °С		Температура начала потерь*, °С	Потери массы в температурных интервалах*, %
	метод ТГА	метод ДМА (сдвиг) при частоте		метод ТГА	метод ДСК		
		1 Гц	100 Гц				
Витур Т-0533-90С	-47	-40	-35	250	245	85	от 85 до 110 °С - 0,22 от 110 до 245 °С - 0
Витур Т-0433-85С	-56	-49	-44	250	225	45	от 45 до 100 °С - 0,66 от 100 до 225 °С - 0,22
ВПС-2,5	35	18	29	160	155	50	от 55 до 100 °С - 0,66 от 100 до 155 °С - 0,66

*метод ДСК, термоанализ проведен на дериватографе Q-1500 D при скорости нагрева – 10 °С/мин., среда - воздух

Температура начала разрушения для полиуретановых термоэластопластов Витур Т-0533-90С и Витур Т-0433-85С составляет 250 °С, для поливинилацетатной пленки ВПС-2,5 - 160 °С.

Таблица 3.3. Коэффициент механических потерь образцов вибропоглощающего материала ВТП-1В при частоте 100 Гц (метод трехточечного изгиба)

Толщина образцов, мм	Температура, °С							
	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
0,5	0,046	0,044	0,049	0,051	0,045	0,035	0,029	0,025
1,0	0,077	0,076	0,079	0,050	0,028	0,020	0,015	0,011
1,5	0,090	0,100	0,120	0,080	0,040	0,030	0,020	0,010
2,0	0,130	0,120	0,150	0,120	0,070	0,050	0,030	0,020
4,0	0,274	0,250	0,266	0,227	0,123	0,066	0,045	0,034

Установлена зависимость коэффициента механических потерь от толщины материала. Как видно из представленных в таблице 3.3 данных, все зависимости независимо от толщины материала носят схожий характер и имеют максимум $\text{tg}\delta$ в области температур -60...0 °С, соответствующей температуре стеклования термопластичного полиуретана марки Витур Т-0533-90С, являющегося основой вибропоглощающего материала марки ВТП-1В. С увеличением толщины образцов ВПМ наблюдается возрастание коэффициента механических потерь практически во всем исследованном диапазоне температур.

3.1.2 Влияние вибропоглощающих свойств слоев на коэффициент механических потерь слоистого ВПМ

Исследовано влияние сочетания вибропоглощающих слоев на основе термопластичного полиуретана (Витур Т-0533-90С) и модифицированного поливинилацетата (ВПС-2,5) на коэффициент механических потерь слоистого материала. Результаты исследования демпфирующих свойств образцов вибропоглощающих материалов в условиях сдвигового нагружения показаны на рисунках 3.1 и 3.2, в условиях трехточечного изгиба – на рисунках 3.3 (а и б) и 3.4.

Приведенные графические зависимости коэффициента механических потерь от температуры для каждого вибропоглощающего материала в различных условиях испытания согласуются между собой по характеру кривых: в первом случае наблюдается один пик ($\text{tg}\delta_{\text{max}}$), лежащий в области отрицательных температур, во втором – два пика (в области отрицательных и положительных температур).

Как было упомянуто ранее, максимальные механические потери в полимерах наблюдаются при температурах выше их температуры стеклования в зоне наиболее сильно развитых релаксационных явлений. Температура стеклования в свою очередь зависит от химического состава полимерного звена – гибкости цепи, стерических эффектов, полярности, наличия пластификаторов и кристаллической фазы, боковых цепей, плотности связей и сополимеризации.

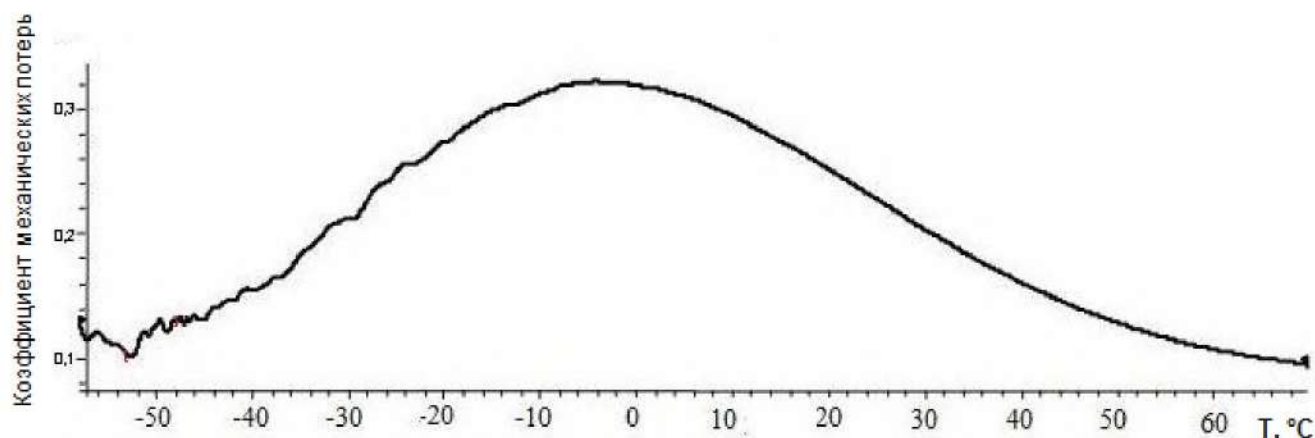


Рисунок 3.1. Температурная зависимость коэффициента механических потерь образцов вибропоглощающего материала на основе ТПУ в условиях сдвигового нагружения при частоте 100 Гц.

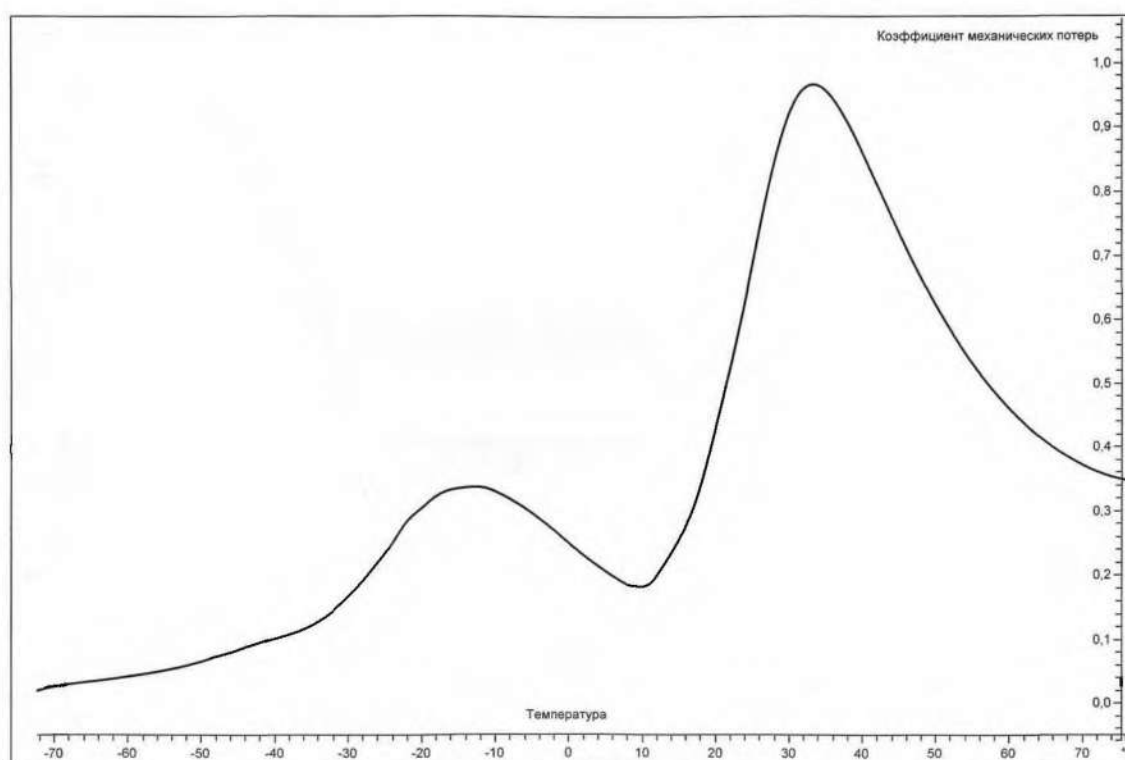


Рисунок 3.2. Температурная зависимость коэффициента механических потерь образцов слоистого вибропоглощающего материала на основе ТПУ и ПВА в условиях сдвигового нагружения при частоте 100 Гц.

В связи с этим очевидно, что возникновение пика в области положительных температур связано с введением в состав слоистого вибропоглощающего материала слоя на основе модифицированного поливинилацетата.

Таблица 3.4 - Демпфирующие свойства образцов вибропоглощающего материала на основе ТПУ и ПВА (метод трехточечного изгиба)

Наименование свойств	Частота, Гц	Температура испытаний, °С							
		-60	-40	-20	0	20	40	60	80
Коэффициент механических потерь, $\text{tg}\delta$	100	0,03	0,04	0,11	0,12	0,10	0,12	0,07	0,06
	300	0,04	0,05	0,13	0,14	0,12	0,14	0,08	0,07
Динамический модуль упругости, E' , ГПа	100	35,0	34,4	33,0	24,1	18,3	15,3	9,2	7,1
	300	36,0	35,7	34,2	24,6	20,5	16,0	13,4	11,8

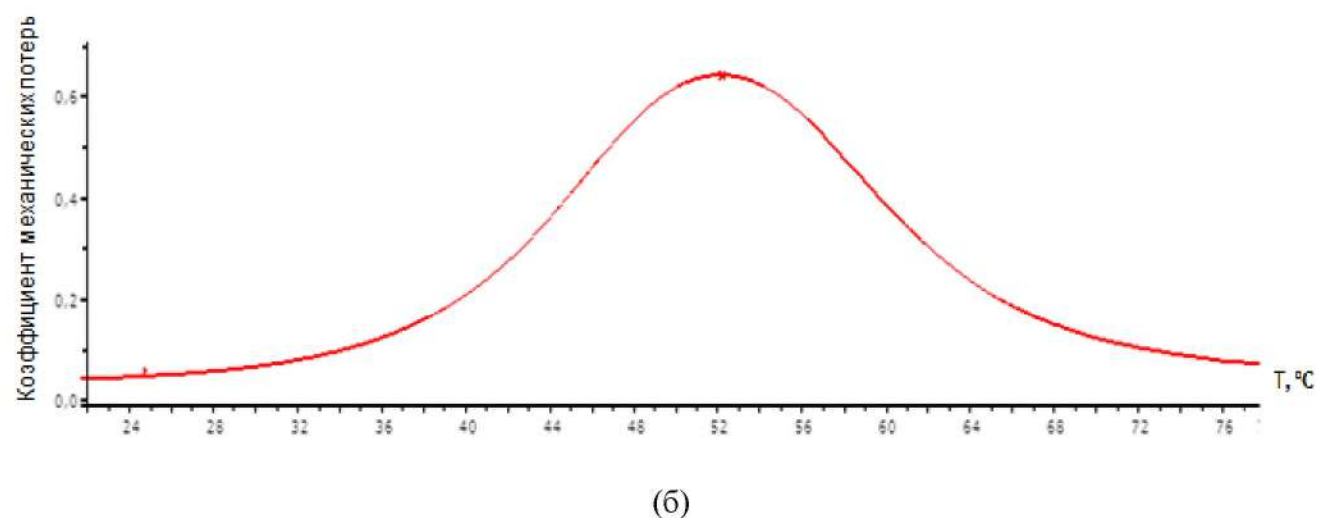
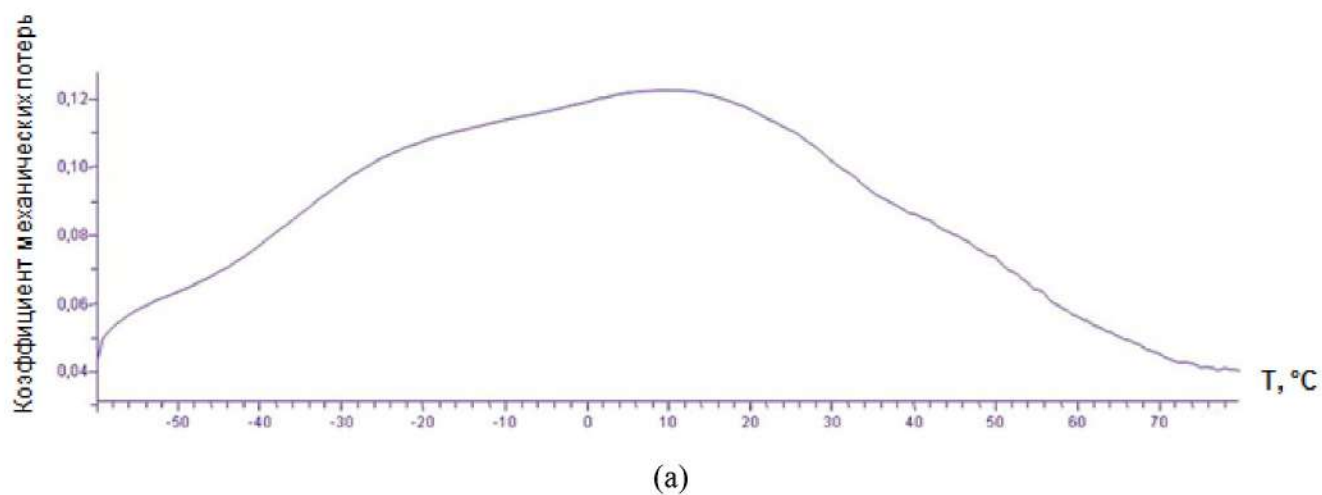


Рисунок 3.3. Температурная зависимость коэффициента механических потерь при частоте 100 Гц в условиях трехточечного изгиба образцов вибропоглощающего материала на основе ТПУ (а) и ВПС-2,5 (б).

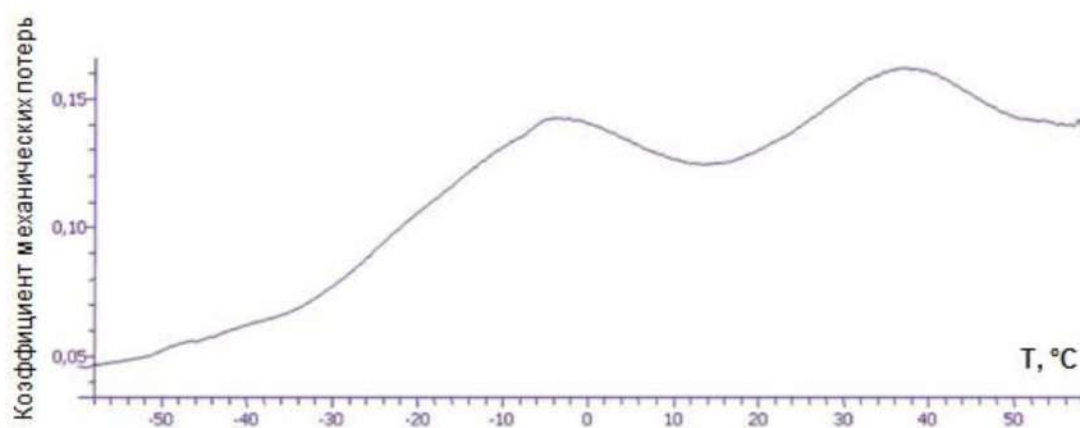


Рисунок 3.4. Температурная зависимость коэффициента механических потерь образцов слоистого вибропоглощающего материала на основе ТПУ и ПВА в условиях трехточечного изгиба при частоте 100 Гц.

Кроме того, из полученных результатов исследования следует, что в условиях сдвигового нагружения при 20 °С слоистый вибропоглощающий материал превосходит по величине коэффициента механических потерь однослойный на основе ТПУ почти в 2 раза, в то время как в условиях трехточечного изгиба при данной температуре указанные вибропоглощающие материалы имеют близкие значения $\text{tg}\delta \approx 0,12$.

Также следует отметить, что температуры, соответствующие максимумам вибропоглощения материалов на кривых для разных методов деформирования, совпадают. При этом значения КМП материала марки ВПС-2,5 ($\text{tg}\delta=0,65$) значительно превосходят показатели пленки Витур даже в условиях трехточечного изгиба. Однако, независимо от метода исследования коэффициент механических потерь не является аддитивной величиной и не складывается из величин $\text{tg}\delta$ Витур Т-0533-90С и ВПС-2,5.

Таким образом, сочетание полимерных слоев, имеющих максимумы вибропоглощения в различных температурных областях, позволяет регулировать температурный диапазон вибропоглощения слоистых материалов (см. таблицу 3.4).

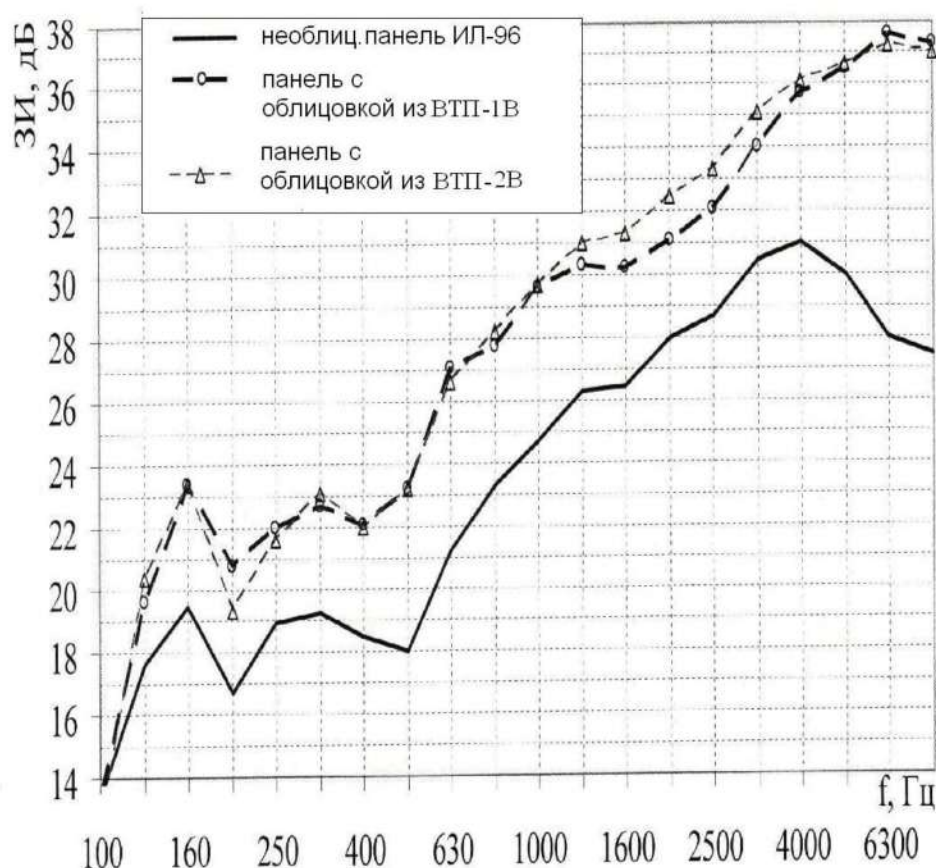


Рисунок 3.5. Результаты акустических испытаний натурной панели фюзеляжа самолета Ил-96 с облицовкой из вибропоглощающих материалов ВТП-1В, ВТП-2В.

Вибропоглощающие материалы марок ВТП-1В и ВТП-2В по аналогии имеют в своем составе слои на основе ТПУ и ПВА соответственно.

Исследования, проведенные в акустической камере «ЦАГИ», показали, что применение вибропоглощающих материалов ВТП-1В и ВТП-2В в виде покрытий позволяет повысить звукоизоляцию панели фюзеляжа на (2-9) дБ в диапазоне частот от 100 до 6300 Гц при комнатной температуре. Результаты испытаний приведены на рисунке 3.5, из которого следует, что при частоте 300 Гц покрытия из вибропоглощающих материалов ВТП-1В и ВТП-2В имеют одинаковую эффективность звукоизоляции. Следовательно, испытание в условиях трехточечного изгиба наиболее приближено к реальным условиям работы панелей фюзеляжа самолетов.

Подтверждением тому, что $\text{tg}\delta$ не является аддитивной величиной, также служат результаты исследования температурной зависимости демпфирующих свойств (коэффициента механических потерь при частоте 100 Гц) образцов однослойного ВПМ на основе ТПУ различных толщин и слоистого вибропоглощающего материала СВПМ-А, включающего помимо указанных слоев из ТПУ армирующий слой и пенополиуретан (см. таблицу 3.5).

Из представленных в таблице 3.5 данных следует, что слоистый вибропоглощающий материал марки СВПМ-А превосходит по величине коэффициента механических потерь отдельные вибропоглощающие слои, входящие в его состав. Наибольшие значения коэффициента механических потерь материал СВПМ-А имеет в области отрицательных температур, что особенно актуально для применения в условиях арктического климата.

Таблица 3.5 - Коэффициент механических потерь* образцов материала СВПМ-А в исходном состоянии при частоте 100 Гц в сравнении с отдельными вибропоглощающими слоями

Образцы для испытаний	Температура испытаний, °С							
	-60	-40	-20	0	20	40	60	80
Слой ВТП-1В толщиной 1,5 мм	0,09	0,10	0,12	0,08	0,04	0,03	0,020	0,01
Слой ВТП-1В толщиной 2,0 мм	0,13	0,12	0,15	0,12	0,07	0,05	0,030	0,02
Слоистый ВПМ марки СВПМ-А	0,19	0,19	0,25	0,17	0,08	0,05	0,04	0,03

*испытания проведены в условиях трехточечного изгиба (ММ 1.595-11-428-2011), образцы - на подложке из алюминиевого сплава толщиной 1 мм

3.1.3 Влияние УНТ на свойства вибропоглощающего слоя на основе термопластичного полиуретана

Как известно, для наполненных полимерных систем характерно наличие дополнительных релаксационных переходов, связанных с подвижностью частиц наполнителя в среде полимера. Рассмотрено влияние наноразмерного наполнителя на относительные потери полимерной матрицы на основе ТПУ – основного компонента вибропоглощающего слоя.

Температурные зависимости коэффициента механических потерь исходной немодифицированной композиции на основе ТПУ и композиций, содержащих углеродные нанотрубки, приведены на рисунках 3.6 и 3.7. Из представленных данных видно, что коэффициент механических потерь образцов из композиции Витур Т-0533-90С с концентрацией нанотрубок марки Tubeall 0,54 % масс. при указанной частоте испытаний во всем диапазоне температур выше по сравнению с композицией, содержащей 0,09 % масс. наполнителя, и превосходит исходную композицию по данному показателю при температурах от 0 до 80 °С. При этом композиция, содержащая 0,09 % масс. нанотрубок Tubeall, имеет $\text{tg}\delta$, приблизительно соответствующий значениям исходной композиции в интервале температур от 0 до 80 °С. При температурах от -60 до -20 °С коэффициент механических потерь образцов из исходной композиции Витур Т-0533-90С превосходит композиции, модифицированные УНТ марки Tubeall. Однако увеличение концентрации нанотрубок марки Tubeall до 1 % масс., как и введение УНТ марки Таунит-М концентрации 0,54 % масс., приводит к возрастанию демпфирующих свойств модифицированной композиции по сравнению с исходной во всем диапазоне температур, в том числе ниже 0 °С. Повышение содержания нанотрубок марки Таунит-М до 1% масс. приводит к возрастанию значений $\text{tg}\delta$ модифицированной композиции в области температур от 0 до +80 °С и незначительно сказывается на данном показателе при отрицательных температурах.

Результаты испытаний, полученные для композиции, содержащей 0,54 % масс. УНТ марки Таунит-М, во всем диапазоне температур по величине коэффициента механических потерь превосходят композицию, содержащую 1 % масс. УНТ той же марки, и приблизительно соответствуют значениям $\text{tg}\delta$ композиции, модифицированной 1 % масс. УНТ марки Tubeall.

Поскольку при введении в исходную композицию на основе ТПУ марки Витур Т-0533-90С УНТ марки Tubeall концентрацией 0,09 и 0,54 % масс. увеличение коэффициента механических потерь наблюдается только при положительных температурах, то введение наноразмерного наполнителя приводит в данном случае к повышению температуры стеклования и, следовательно, УНТ выступают здесь в роли активного наполнителя.

Таким образом, независимо от марки исследованного наноразмерного наполнителя, введение УНТ оказывает влияние на вибропоглощающие свойства композиции на основе

термопластичного полиуретана. При этом величина коэффициента механических потерь в различных температурных областях зависит от концентрации и марки наполнителя.

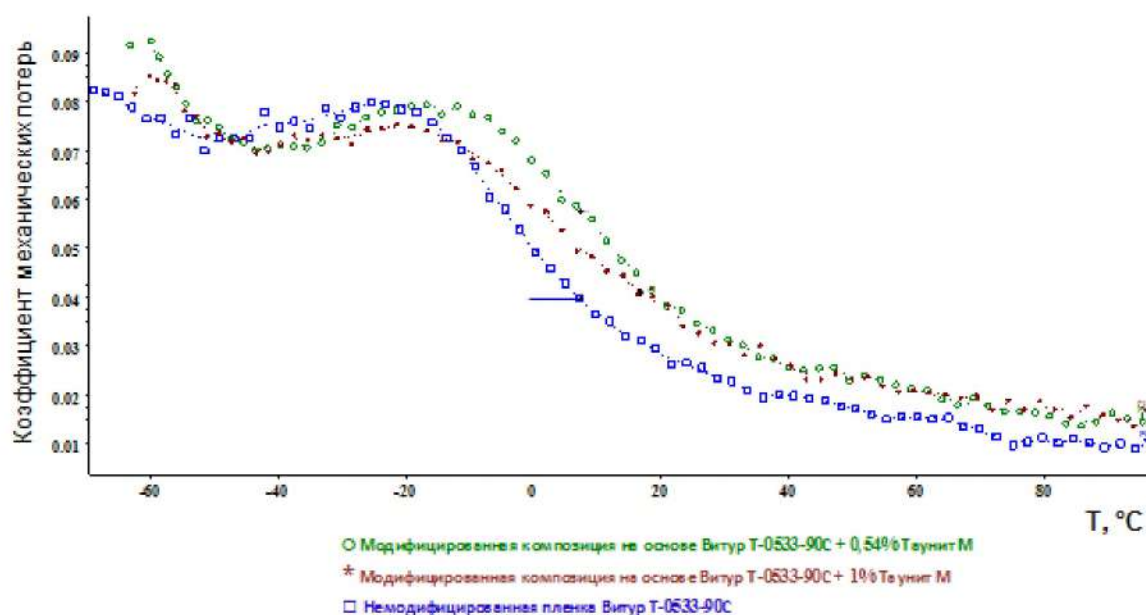


Рисунок 3.6. Температурная зависимость коэффициента механических потерь при частоте 100 Гц образцов композиции на основе Витур Т-0533-90С, модифицированной УНТ марки Таунит-М, в сравнении с исходной

Результаты исследования влияния УНТ марки Tubeall на основные физические (водо- и влагопоглощение) и механические (прочность и относительное удлинение при растяжении) свойства образцов из модифицированной композиции на основе Витур-Т-0533-90С представлены в таблице 3.6.

Из представленных в таблице 3.6 данных видно, что образцы, изготовленные из смеси Витур Т-0533 с концентрациями УНТ 0,09 и 0,54 % масс. имеют близкие значения водопоглощения и одинаковые значения влагопоглощения за 24 ч. Сравнение со свойствами композиции Витур Т-0533-90С, не содержащей УНТ, показало, что введение наноразмерного наполнителя увеличивает влагопоглощение матрицы из термопластичного полиуретана на 40 %, но при этом практически не влияет на ее водопоглощение за 24 ч.

Прочность при растяжении полимерной матрицы, напротив, снизилась в результате введения УНТ, причем с увеличением их концентрации с 0,09 до 0,54 % масс. на 15 и 27 % по сравнению с исходной композицией соответственно. При этом введение в исходную композицию 0,54 % масс. УНТ приводит к снижению относительного удлинения при разрыве на 11%.

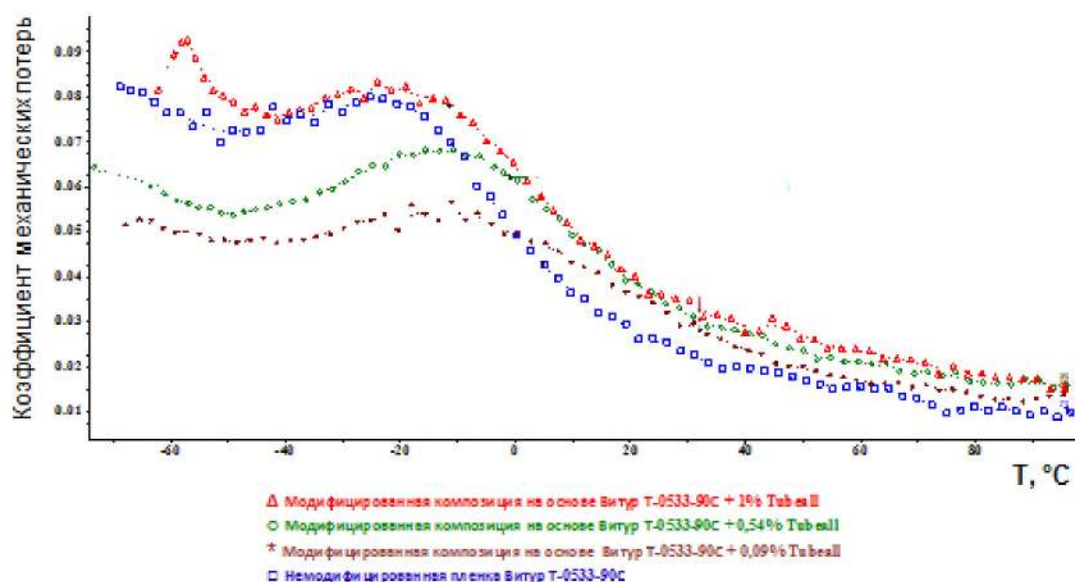


Рисунок 3.7. Температурная зависимость коэффициента механических потерь образцов композиции на основе Витур Т-0533-90С, модифицированной УНТ марки Tubeall, в сравнении с исходной, при частоте 100 Гц.

Таблица 3.6 - Свойства образцов из модифицированной композиции на основе Витур Т-0533-90С и УНТ марки Tubeall различной концентрации в сравнении с образцами из пленки Витур-Т-0533-90С (толщиной 1,0 мм)

Свойство	Витур Т-0533-90С + 0,09% УНТ	Витур Т-0533-90С + 0,54% УНТ	Витур Т-0533-90С
Влагопоглощение за 24 ч, %	1,60	1,60	0,95
Водопоглощение за 24 ч, %	1,69	1,65	1,60÷1,70
Прочность при растяжении, МПа	43,9	38,2	52,0
Относительное удлинение, %	610	540	610

Таким образом, полученные результаты исследования механических свойств наполненных композиций лишь частично коррелируют с соответствующими данными ДМА: снижение прочности при растяжении, связанное с повышением подвижности, хорошо согласуется с возрастанием коэффициента механических потерь. Аналогичная ситуация наблюдается с физическими свойствами – можно предположить, что введение гидрофильного наполнителя способствует повышению адсорбции влаги, однако это никак не объясняет одинаковое водопоглощение наполненных и ненаполненных образцов.

3.2. Выбор армирующего слоя

3.2.1 Металлический армирующий слой

Влияние состава металлического армирующего слоя на вибропоглощающие свойства АВПМ можно проследить по сравнительным результатам определения коэффициента механических потерь экспериментальных образцов слоистого армированного вибропоглощающего материала типа «сэндвич» - алюмотермоэластопласта, включающего два армирующих слоя, расположенных симметрично относительно вибропоглощающей прослойки - изготовленных методом прессования с использованием сплавов различных марок.

Таблица 3.7 – Коэффициент механических потерь экспериментальных образцов слоистого вибропоглощающего алюмотермоэластопласта, изготовленных методом прессования.

Состав образца	Толщина слоя, мм	Коэффициент механических потерь при $T=20^{\circ}\text{C}$ и частоте 100 Гц
Сплав 1441 ВТП-1В Сплав 1441	0,44 0,55 0,44	0,09
Сплав 1441 ВТП-1В Сплав 1441	0,44 0,75 0,44	0,10
Сплав 16АТ ВТП-1В Сплав 16АТ	0,44 0,55 0,44	0,08
Сплав 16АТ ВТП-1В Сплав 16АТ	0,44 0,75 0,44	0,09

Из представленных в таблице 3.7 данных видно, что значения $\text{tg}\delta$ при 20°C и частоте 100 Гц образцов АВПМ, имеющих равные толщины вибропоглощающих и армирующих слоев и отличающихся только маркой сплава армирующего слоя, практически совпадают (образцы, включающие в состав слой из алюминиевого сплава 1441 незначительно превосходят аналоги с использованием алюминиевого сплава Д16).

Таким образом, можно сделать вывод, что коэффициент механических потерь АВПМ практически не зависит от марки сплава металлического армирующего слоя.

Рассмотрено влияние толщины металлического армирующего слоя на другие свойства АВПМ. Проследить зависимость между межслойной адгезией и толщиной армирующего слоя можно по данным, приведенным в таблице 3.8. Однако в данном случае стоит учитывать также влияние технологических параметров процесса прессования слоистого материала на прочность связи между слоями.

Таблица 3.8 – Прочность при расслаивании экспериментальных образцов армированного вибропоглощающего материала* при различных режимах прессования

Температура прессования, °С	Прочность при расслаивании, Н/мм		Качество отпрессованных образцов
	Удельное давление прессования, МПа		
	0,2	0,4	
Армирующий слой – алюминиевая фольга толщиной 65 мкм			
155	3,4	4,5	-
160	3,3	3,0	-
170	4,5	3,2	облой 2-14 мм, пузыри
Армирующий слой – алюминиевая фольга толщиной 90 мкм			
155	2,1	1,2	-
160	2,5	3,6	-
170	3,2	3,2	облой 2-9 мм, пузыри

*экспериментальные образцы АВПМ изготавливались методом прямого контактного прессования. вибропоглощающий слой - базовый ВПМ марки ВТП-1В

Прочность связи между слоями возрастает с повышением температуры прессования (при давлении 0,2 МПа) для всех вариантов толщин фольги, однако наиболее высокие значения данного показателя имеют образцы с толщиной армирующего слоя 65 мкм. С повышением давления прессования эта зависимость нарушается. Более того, при $T=170$ °С снижается качество отпрессованных образцов, и образуются значительные по размерам выпрессовки (облой) и пузыри.

Оптимальным режимом изготовления экспериментальных образцов, имеющих в качестве армирующего слоя алюминиевую фольгу, является $T_{пр.}=(155\pm 5)$ °С и $P_{уд.}=0,4$ МПа, обеспечивающие максимальное значение прочности при расслаивании 3,6 - 4,5 Н/мм и отсутствие дефектов при прессовании.

Из данных, представленных в таблице 3.9, следует, что межслойная адгезия слоистого АВПМ зависит от толщины армирующего слоя, однако прямой зависимости от данного параметра и структуры материала не наблюдается, в то время как с увеличением толщины вибропоглощающего слоя возрастает прочность связи между слоями. Поверхностная плотность экспериментальных образцов возрастает с увеличением толщин или количества слоев АВПМ.

В таблице 3.10 также приведены результаты исследования влияния толщины фольги на горючесть и поверхностную плотность образцов вибропоглощающего материала, состоящего из двух вибропоглощающих слоев термопластов (на основе ТПУ и ПВА) и защитного армирующего слоя из фольгопласта. Из представленных в таблице 3.10 данных следует, что применение фольги толщиной 15 мкм позволяет получить ВПМ с низким значением поверхностной плотности, но при этом не удовлетворяющий требованиям по горючести. При увеличении толщины фольги до 25 и 50 мкм величина поверхностной плотности слоистого вибропоглощающего материала остается на том же уровне, однако испытания на горючесть показывают, что по потере массы и высоте прогорания лучшие результаты получены для ВПМ

с толщиной фольги 50 мкм. Таким образом, оптимальной является толщина армирующего слоя из алюминиевой фольги, равная 50 мкм.

Таблица 3.9 – Физические и механические свойства АВПМ с армирующим слоем из алюминиевой фольги

Вариант состава	Состав образца		Прочность при расслаивании, Н/мм	Поверхностная плотность, кг/м ²
	ВТП-1В толщина, мм	алюминиевая фольга толщина, мкм		
1	0,5	65	0,2	0,8
2	1,0	65	5,1	1,2
3	1,5	65	7,8	1,8
4	0,5	90	0,5	0,7
5	1,0	90	4,4	1,5
6	1,5	90	5,4	1,8
7*	0,5 и 0,5	90 и 90	0,6	1,5
8*	1,0	90 и 90	2,7	1,6

*чередующиеся слои – ВТП-1В и фольги (четырёхслойный образец, вариант 7) и фольги и ВТП-1В (трехслойный образец, вариант 8)

Таблица 3.10 - Свойства ВПМ в зависимости от толщины исходных слоев – вибропоглощающего из полиуретана (ПУ) и армирующего - из алюминиевой фольги

Толщина, мм			Р, кг/м ²	Горючесть			
ПУ слоя	фольги	ВПМ		$\tau_{\text{ост.}}$, сек	$h_{\text{прог.}}$, мм	Потеря массы, %	Категория
0,55-0,70	15	<u>1,40</u> 1,36-1,43	1,70	155	175	6,67	сгорающий
0,55-0,70	25	<u>1,34</u> 1,31-1,37	1,62	0	49	0,24	трудносгорающий
0,55-0,70	50	<u>1,37</u> 1,33-1,40	1,71	3-5	38	0,21	самозатухающий

Влияние толщины армирующего и вибропоглощающего слоев на коэффициент механических потерь слоистых вибропоглощающих материалов можно проследить на примере выбора состава вибропоглощающего алюмотермоэластопласта. Результаты исследования

вибропоглощающих свойств экспериментальных образцов алюмотермоэластопласта, изготовленных методом прессования, приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Коэффициент механических потерь экспериментальных образцов слоистого вибропоглощающего алюмотермоэластопласта, изготовленных прессованием.

№№ состава образца	Состав образца	Толщина слоя, мм	Коэффициент механических потерь при $T=20^{\circ}\text{C}$ и частоте 100 Гц
1	Сплав 1441	0,32	0,07
	ВТП-1В	0,55	
	Сплав 1441	0,32	
2	Сплав 1441	0,32	0,09
	ВТП-1В	0,75	
	Сплав 1441	0,32	
3	Сплав 1441	0,32	0,11
	ВТП-1В	1,00	
	Сплав 1441	0,32	
4	Сплав 1441	0,32	0,15
	ВТП-1В	1,50	
	Сплав 1441	0,32	
5	Сплав 1441	0,44	0,09
	ВТП-1В	0,55	
	Сплав 1441	0,44	
6	Сплав 1441	0,44	0,10
	ВТП-1В	0,75	
	Сплав 1441	0,44	
7	Сплав 1441	0,44	0,11
	ВТП-1В	1,00	
	Сплав 1441	0,44	
8	Сплав Д16АТ	0,44	0,08
	ВТП-1В	0,55	
	Сплав Д16АТ	0,44	
9	Сплав Д16АТ	0,44	0,09
	ВТП-1В	0,75	
	Сплав Д16АТ	0,44	

Из представленных в таблице 3.11 данных видно, что при 20°C и частоте 100 Гц коэффициент механических потерь алюмотермоэластопласта возрастает с увеличением толщины вибропоглощающей прослойки для всех трех видов исследованных образцов независимо от толщины и состава армирующих обшивок.

Влияние толщины армирующих слоев прослеживается в результате сравнения КМП групп образцов №№1-3 и 5-7, из которого видно, что образцы с обшивками толщиной 0,44 мм незначительно превосходят аналоги с толщиной 0,32 мм.

Таким образом, можно сделать вывод, что вибропоглощающие свойства (значение коэффициента механических потерь) слоистых армированных вибропоглощающих материалов типа «сэндвич» определяются в основном толщиной внутреннего вибропоглощающего слоя.

Влияние толщины армирующего слоя из фольги на диссипативные свойства экспериментальных образцов ВПМ, состоящих из двух вибропоглощающих слоев термопластов (на основе ТПУ и ПВА с толщинами, равными $(0,6 \pm 0,1)$ и $(0,55 \pm 0,15)$ мм соответственно) и защитного армирующего слоя из фольгопласта, показано в таблицах 3.12-3.14.

Таблица 3.12 - Диссипативные характеристики* экспериментальных образцов ВПМ с толщиной фольги 15 мкм

Температура, °C	Частота, Гц			
	100		1000	
	E', МПа	tgδ	E', МПа	tgδ
-60,00	534	0,03	531	0,04
-40,00	343	0,09	418	0,06
-20,00	104	0,29	130	0,19
0	25	0,21	39	0,31
20,00	10	0,24	22	0,25
40,00	0,7	0,70	3,4	0,51
60,00	0,35	0,36	0,76	0,53
80,00	0,15	0,21	0,9	0,40

*определены методом ДМА в условиях сдвигового нагружения

Максимальное значение коэффициента механических потерь всех рассмотренных вибропоглощающих материалов получено при температуре 40 °C при частотах 100 и 1000 Гц: для ВПМ с толщиной фольги 15 мкм $\text{tg}\delta_{\text{max}}=0,7$ (100 Гц) и $\text{tg}\delta_{\text{max}}=0,51$ (1000 Гц), для ВПМ с толщиной фольги 25 мкм $\text{tg}\delta_{\text{max}}=0,76$ и $\text{tg}\delta_{\text{max}}=0,63$ при 100 Гц и 1000 Гц соответственно, для ВПМ с толщиной фольги 50 мкм значения $\text{tg}\delta_{\text{max}}$ как для частот 100 Гц, так и 1000 Гц равняются 0,86.

Как видно из полученных результатов, толщина фольги оказывает влияние на диссипативные характеристики ВПМ. Наиболее высокими вибродемпфирующими свойствами

в исследованном диапазоне температур обладают экспериментальные образцы вибропоглощающего материала с толщиной фольги 50 мкм.

Таблица 3.13 - Диссипативные характеристики* экспериментальных образцов ВПМ с толщиной фольги 25 мкм

Температура, °C	Частота, Гц			
	100		1000	
	E', МПа	tgδ	E', МПа	tgδ
-60,00	541	0,03	537	0,04
-40,00	369	0,08	467	0,04
-20,00	107	0,32	150	0,21
0	27	0,25	48	0,34
20,00	12	0,29	25	0,27
40,00	1,4	0,76	5,6	0,63
60,00	0,64	0,45	1,38	0,53
80,00	0,19	0,26	1,05	0,45

**определены методом ДМА в условиях сдвигового нагружения*

Таблица 3.14 - Диссипативные характеристики* экспериментальных образцов ВПМ с толщиной фольги 50 мкм

Температура, °C	Частота, Гц			
	100		1000	
	Модуль упругости, МПа	tgδ	Модуль упругости, МПа	tgδ
-60,00	580	0,05	578	0,034
-40,00	460	0,12	532	0,07
-20,00	114	0,43	240	0,31
0	30	0,36	65	0,43
20,00	13	0,40	27	0,38
40,00	1,6	0,86	6,4	0,86
60,00	0,7	0,46	1,77	0,66
80,00	0,23	0,34	1,29	0,43

3.2.2 Композиционный армирующий слой

При разработке АВПМ для снижения вибрации элементов конструкции, выполненных из ПКМ, в частности из углепластиков, необходимо учитывать ограничения по использованию рассмотренных выше металлических армирующих слоев из-за возможного образования контактной пары углепластик-алюминий.

Как известно, максимальные потери механической энергии ($\operatorname{tg}\delta_{\max}$) в полимерах проявляются в области температуры стеклования. Поэтому идея решения поставленной задачи заключалась в выборе армирующего слоя, который будет не только инициировать сдвиговые деформации в вибропоглощающем слое, но и вносить свой вклад в величину $\operatorname{tg}\delta$ при $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Из этого следует, что армирующий слой также должен иметь полимерную основу. Этим условиям удовлетворяет армирующий слой на основе ПКМ.

Для изготовления армирующего слоя ВПМ были выбраны пленка ВК-51 в качестве связующего, так как её температура стеклования в отвержденной форме составляет $90\text{--}94\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вибропоглощающий слой был изготовлен на основе материала ВТП-1В толщиной 2,0 мм.

Экспериментальные образцы АВПМ на основе вибропоглощающего слоя из ВТП-1В и армирующего слоя из двух слоев клеевой пленки ВК-51, чередующихся с двумя слоями армирующего наполнителя, были изготовлены прямым контактным прессованием. При этом температура и время выдержки под давлением обусловлены процессом отверждения клеевой пленки ВК-51 - $T_{\text{пр.}}=(125\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 3 часа соответственно, а удельное давление прессования подбиралось экспериментальным путем в зависимости от прочности при расслаивании экспериментальных образцов АВПМ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$: при $P_{\text{уд.}}=1\text{ атм.}$ $\sigma_{\text{рассл.}}$ составляет 12,0 Н/мм и 0,1 Н/мм, а при $P_{\text{уд.}}=2\text{ атм.}$ – 32,5 Н/мм и 0,8 Н/мм соответственно.

Влияние армирующего наполнителя на комплекс свойств АВПМ показано в таблице 3.15, из которой следует, что образцы с армирующим наполнителем на основе арамидной ткани являются на 800 г более легкими по сравнению с аналогами на основе стеклоткани. При этом межслойная адгезия при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ образцов АВПМ с армирующим слоем на основе стеклоткани почти в 10 раз выше, чем у образцов с армирующим слоем на основе арамидной ткани, однако при повышении температуры испытаний до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается обратный эффект. После выдержки при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 500 и 1000 ч межслойная адгезия образцов АВПМ с армирующим слоем на основе стеклоткани снижается относительно значения в исходном состоянии на 8,6% и 12% соответственно, в то время как для образцов с армирующим слоем на основе арамидной ткани $\sigma_{\text{рассл.}}$ не изменяется.

Влияние вида связующего армирующего слоя на комплекс свойств АВПМ представлено в таблице 3.16.

Таблица 3.15 – Физические и механические свойства экспериментальных образцов АВПМ различного состава

Свойство	Вид армирующего наполнителя			
	Стеклоткань Т-10-80		Арамидная ткань Русар арт. 86-153	
Поверхностная плотность, кг/м ²	3,4		2,6	
Прочность при расслаивании, Н/мм	20 °С	100 °С	20 °С	100 °С
Исходное состояние	32,5	0,8	3,2	2,0
500 ч выдержки при Т=100 °С	29,7	-	3,2	-
1000 ч выдержки при Т=100 °С	28,6	-	3,2	-

Таблица 3.16 – Физические и механические свойства экспериментальных образцов АВПМ различного состава экспериментальных образцов

Свойство	Связующее армирующего слоя			
	Клеевая пленка ВК-51		Клеевая пленка ВК-46	
Поверхностная плотность, кг/м ²	3,4		3,3	
Прочность при расслаивании, Н/мм	20 °С	100 °С	20 °С	100 °С
	32,5	0,8	9,5	-
Категория горючести	сгорающий		самозатухающий	

Из представленных в таблице 3.16 данных следует, что при использовании в качестве связующего армирующего слоя клеевой пленки ВК-51 преимущество достигается только по величине межслойной адгезии, в то время как экспериментальные образцы, изготовленные с ее использованием, являются сгорающими. В связи с этим для решения поставленной задачи предпочтительнее использовать самозатухающую после отверждения клеевую пленку ВК-46.

Таблица 3.17 – Коэффициент механических потерь экспериментальных образцов АВПМ различного состава на подложке из ПКМ при частоте 100 Гц

Подложка	Коэффициент механических потерь			
	T=20 °C		T=100 °C	
	Наполнитель армирующего композиционного слоя			
	стеклоткань T-10-80	aramидная ткань Русар арт. 86-153	стеклоткань T-10-80	aramидная ткань Русар арт. 86-153
ВКУ-39	0,11	0,09	0,05	0,05
	Связующее армирующего слоя (клеевая пленка)			
	ВК-51	ВК-46	ВК-51	ВК-46
	0,11	0,11	0,05	0,05

Влияние вида армирующего наполнителя и связующего композиционного армирующего слоя на коэффициент механических потерь АВПМ продемонстрировано в таблице 3.17. Как видно из представленных в ней данных, образцы с армирующим слоем на основе стеклоткани

на подложке из углепластика ВКУ-39 при 20 °С имеют коэффициент механических потерь на 20 % выше в сравнении с аналогами на основе арамидной ткани, а при повышении температуры испытаний до 100 °С – значения $\text{tg}\delta$ одинаковые.

Вероятно, вибропоглощающие свойства экспериментальных образцов с различным связующим армирующего слоя при указанных температурах совпадают благодаря близким термодинамическим свойствам использованных материалов.

Таким образом, на величину коэффициента механических потерь вибропоглощающих материалов с композиционным армирующим слоем оказывает влияние природа наполнителя. Проследить влияние состава связующего армирующего слоя возможно в случае использования полимерных матриц, имеющих различные температуры стеклования.

3.2.3 Сравнительная характеристика влияния металлического и композиционного армирующих слоев на комплекс свойств АВПМ

Проследить влияние природы армирующего слоя на свойства АВПМ можно на примере сравнения характеристик экспериментальных образцов вибропоглощающих материалов с металлическим и композиционным армирующими слоями.

Состав экспериментальных образцов вибропоглощающих материалов включал вибропоглощающий слой на основе листового материала марки ВТП-1В 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 полимерных композиционных материалов – углепластика и стеклопластика. В качестве связующего в композиционных армирующих слоях использовалась эпоксикаучуковая клеевая пленка ВК-51, а в качестве наполнителя – углеткань УТО-300Т-200 IMS-65 и стеклоткань Т-10-80 соответственно. Два слоя клеевой пленки ВК-51 поочередно чередовались с двумя слоями стеклоткани Т-10-80 или углеродной ткани УТО-300Т-200 IMS-65 соответственно.

Исследованы следующие свойства экспериментальных образцов вибропоглощающих материалов: поверхностная плотность, прочность при отслаивании (межслойная адгезия), коэффициент механических потерь.

Показано, что экспериментальные образцы вибропоглощающего материала с композиционными армирующими слоями обладают меньшей поверхностной плотностью по сравнению с образцами с армирующим слоем из алюминиевого сплава Д16-АТ. При этом поверхностная плотность образцов с армирующим слоем на основе ленты-полотна из углеродного волокна УТО-300Т-200 IMS-65 меньше, чем у образцов с армирующим слоем на основе стеклоткани Т-10-80 (таблица 3.18).

Таблица 3.18 – Результаты определения поверхностной плотности и прочности при отслаивании экспериментальных образцов многослойных АВПМ

Состав экспериментальных образцов вибропоглощающих материалов	Поверхностная плотность, кг/м ²	Прочность при отслаивании, Н/мм
Образцы с армирующим слоем из алюминиевого сплава Д16-АТ	3,55	26,0
Образцы с армирующим слоем на основе ленты-полотна УТО-300Т-200 IMS-65 из углеродного волокна 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

Из полученных результатов также следует, что образцы вибропоглощающего материала с армирующими слоями из алюминиевого сплава Д16-АТ и на основе стеклоткани Т-10-80 превосходят по значению прочности при расслаивании образцы с армирующим слоем на основе ткани из углеродного волокна УТО-300Т-200 IMS-65 почти в 2 раза.

Исследовано также влияние технологических параметров прессования (температуры и времени выдержки под давлением) на межслойную адгезию (прочность при расслаивании) экспериментальных образцов. Высокие значения $\sigma_{отсл.}$ имеют образцы, изготовленные по различным режимам – как при $T_{пр.}=(165\pm5)^{\circ}\text{C}$ и $\tau_{пр.}=5$ мин. (металлический армирующий слой), так и при $T_{пр.}=(130\pm5)^{\circ}\text{C}$ $\tau_{пр.}=3$ ч. (композиционный армирующий слой).

Можно предположить, что в данном случае причина заключается в природе соединяемых компонентов армирующих и вибропоглощающих слоев и их сродстве друг с другом. Различие в значениях прочности при отслаивании образцов вибропоглощающего материала с композиционными армирующими слоями может быть объяснено различной предварительной подготовкой наполнителей (углеродной и стеклотканей) армирующих слоев.

Проведено исследование влияния природы армирующего слоя на коэффициент механических потерь АВПМ. Определение коэффициента механических потерь образцов проводили в условиях трехточечного изгиба в диапазоне температур от 20 до +100 °С и при частоте 100 Гц. В качестве контрольных были рассмотрены значения коэффициента механических потерь при 20 °С и повышенной температуре 100 °С. Значения при нормальной температуре, как правило, приводятся для всех вибропоглощающих материалов, а при 100 °С необходимы, поскольку ВТП-1В является вибропоглощающим материалом авиационного назначения, а температура акустически нагруженных поверхностей, например, в области двигателя, может достигать подобных значений.

Таблица 3.19 – Коэффициент механических потерь образцов вибропоглощающих материалов

Состав экспериментальных образцов вибропоглощающих материалов	Коэффициент механических потерь при частоте 100 Гц (на подложке из алюминиевого сплава Д16-АТ толщиной 1,0 мм) при температуре испытаний					
	20 °С	100 °С				
ВТП-1В в виде однослойного покрытия	0,07	0,02				
Образцы с армирующим слоем из алюминиевого сплава Д16-АТ	0,15-0,16	0,07				
Направление выкладки наполнителя армирующего слоя						
Образцы с армирующим слоем на основе ленты-полотна УТО-300Т-200 IMS-65 из углеродного волокна 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	-	-

Для сравнения приведем результаты исследования коэффициента механических потерь образцов вибропоглощающего материала ВТП-1В без армирующего покрытия на подложке из Д-16АТ толщиной 1,0 мм (см. рисунок 3.8 (а)).

Из представленных в таблице 3.19 данных видно, что коэффициент механических потерь образцов ВТП-1В со слоем из алюминиевого сплава больше, чем у образцов ВТП-1В без армирующего покрытия как при нормальной, так и при повышенной температурах, в 2 и 3,5 раза соответственно. Таким образом, подтверждается большая эффективность армированных вибропоглощающих материалов по сравнению с однослойными вибропоглощающими покрытиями.

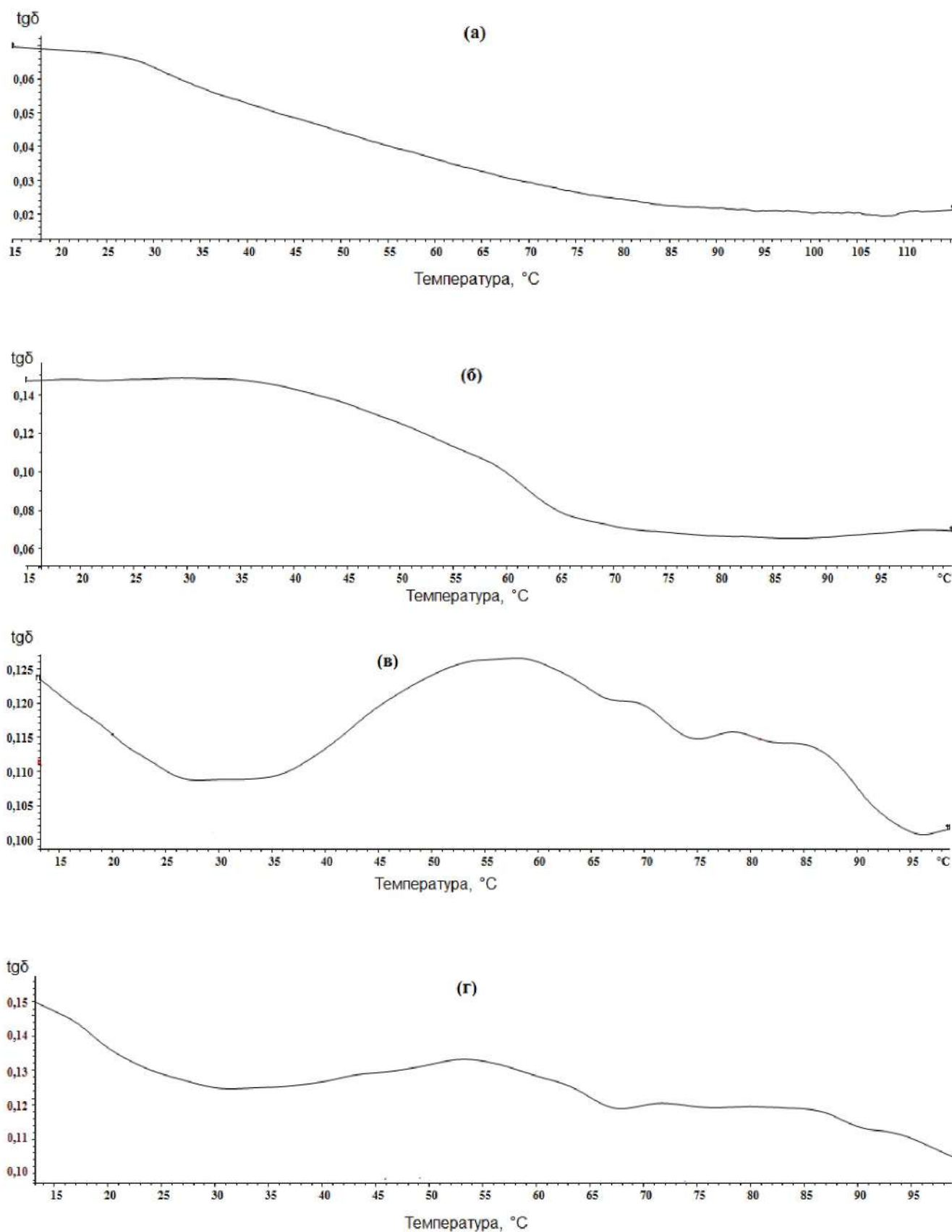


Рисунок 3.8. Температурная зависимость КМП ВПМ марки ВТП-1В в виде однослойного покрытия (а) и АВПМ с различными армирующими слоями: (б) – из металла; (в) – с композиционным на основе углеродной ткани с углом выкладки наполнителя 0° ; (г) – композиционным на основе углеродной ткани с углом выкладки наполнителя 90° .

Температурная зависимость коэффициента механических потерь вибропоглощающего материала ВТП-1В с композиционным армирующим слоем на основе углеродной ткани (с углами выкладки наполнителя 0° и 90° соответственно) и эпокси-каучуковой клеевой пленки марки ВК-51 приведена на рисунке 3.8 (в) и (г), контрольные значения для различных направлений выкладки - в таблице 3.19. Представленные данные также превышают значения $\text{tg}\delta$ образцов ВТП-1В без армирующего покрытия в 1,5-2 раза при 20°C и в 5 раз при 100°C .

Увеличение коэффициента механических потерь (как относительно значений образцов ВТП-1В без армирующего слоя, так и для аналогичных образцов с металлическим армирующим слоем) при 100°C может быть объяснено влиянием связующего армирующего слоя. Как уже было показано выше, максимальные механические потери в полимерах наблюдаются выше их температуры стеклования: T_g , использованной в качестве связующего эпокси-каучуковой клеевой пленки, согласно данным термомеханического анализа (ТМА), находится в области $90-110^\circ\text{C}$. Следовательно, можно предположить, что связующее армирующего слоя также вносит свой вклад в величину $\text{tg}\delta$.

Из представленных в таблице 3.19 данных следует, что коэффициент механических потерь при 20°C образцов вибропоглощающего материала ВТП-1В с композиционным армирующим слоем на основе стеклоткани в данном случае также превышает аналогичные значения образцов ВТП-1В без армирующего слоя в 1,5-1,7 раз в зависимости от направления выкладки наполнителя. Из анализа представленных данных следует, что армированные ВПМ превосходят по величине коэффициента механических потерь ВПП независимо от природы армирующего слоя. Однако, для композиционных армирующих слоев небольшой толщины может иметь место зависимость КМП составной конструкции от термодинамических свойств связующего.

Таким образом, по величине коэффициента механических потерь образцы ВТП-1В с композиционными армирующими слоями превосходят аналогичные образцы ВТП-1В с металлическим армирующим слоем при 100°C , а при 20°C - наблюдается обратная картина: образцы ВТП-1В с металлическим армирующим слоем превосходят образцы ВТП-1В с композиционными армирующими слоями, т.е. вибропоглощающие материалы с композиционными армирующими слоями целесообразно использовать в условиях высоких температур, например, для снижения вибрации от двигателей, воздухопроводов-отопителей и т.п.

Рассмотрено влияние направления выкладки наполнителя армирующего слоя на коэффициент механических потерь при 20°C образцов вибропоглощающих материалов с композиционными армирующими слоями. В зарубежной литературе этому обстоятельству уделяется значительное внимание, в особенности при разработке полимерных композиционных материалов с повышенными вибропоглощающими свойствами. Влияние направления выкладки

наполнителя на величину коэффициента механических потерь прослеживается при сравнении данных, приведенных на рисунке 3.8 (в) и (г) и представленных в таблице 3.19. Из них следует, что для исследованных в данной работе наполнителей армирующих слоев предпочтительнее использовать угол выкладки 90° , так как ему соответствуют большие значения коэффициента механических потерь. При этом для направлений выкладки наполнителя 90° и 45° значения $\text{tg}\delta$ при 20°C образцов вибропоглощающего материала ВТП-1В с армирующим слоем на основе углеродной ткани больше, чем для аналогичных образцов с наполнителем из стеклоткани, а для 0° и 30° - совпадают с ними.

Из анализа представленных выше данных, следует, что наличие армирующего слоя и его природа оказывают влияние на демпфирующие свойства вибропоглощающих материалов. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что наличие армирующего слоя приводит к возрастанию поверхностной плотности и, следовательно, массовых затрат, однако при этом повышается коэффициент механических потерь, т.е. армированные вибропоглощающие материалы по демпфирующим свойствам являются более эффективными по сравнению с однослойными вибропоглощающими покрытиями.

На величину коэффициента механических потерь вибропоглощающих материалов с композиционным армирующим слоем оказывает влияние его состав - природа наполнителя и направление выкладки композиционного армирующего слоя.

3.3. Технология соединения слоев армированного ВПМ между собой

Для обеспечения работоспособности АВПМ требуется необходимый уровень адгезии между слоями для сохранения монолитности материала и исключения его расслоения.

Особый интерес в данном случае представляет сравнение прессового и клеевого способов соединения армирующего и вибропоглощающих слоев между собой. В связи с этим исследовано влияние технологических параметров режима склеивания и химической природы клея на прочность связи между слоями АВПМ с металлическим армирующим слоем.

При изготовлении экспериментальных образцов АВПМ типа «сэндвич» - алюмотермоэластопласта для склеивания вибропоглощающего слоя с алюминиевыми сплавами были выбраны клеи холодного отверждения различной химической природы: эпоксидный и на основе полиуретанового каучука.

Для каждого клея были опробованы два режима отверждения: при температуре 20°C и ускоренный при 60°C - для эпоксидного клея и при 100°C - для полиуретанового клея. Склеивание эпоксидным клеем проводилось при контактном давлении, при использовании полиуретанового клея отверждение проводили под давлением.

Результаты определения прочности при отслаивании ($\sigma_{отсл.}$) изготовленных образцов при 20 и 80 °С представлены в таблице 3.20. Установлено, что прочность при отслаивании $\sigma_{отсл.}$ клеевых соединений образцов вибропоглощающего алюмотермоэластопласта с эпоксидным клеем составляет 2,9 Н/мм по первому режиму и 2,6 Н/мм по ускоренному, а $\sigma_{отсл.}$ образцов с полиуретановым клеем – 2,2 Н/мм и 2,0 Н/мм соответственно, следовательно, для обоих клеев оптимальным является режим отверждения при 20 °С в течение 24 ч. Для образцов клеевых соединений, отвержденных по оптимальному режиму, была определена прочность при отслаивании при 80 °С: для эпоксидного клея $\sigma_{отсл.}$ составляет (0,6÷0,7) Н/мм, на полиуретановом клее – (0,5÷0,6) Н/мм. Таким образом, более высокие показатели имеют образцы клеевых соединений, изготовленные с использованием эпоксидного клея.

Для изготовления экспериментальных образцов классического двухслойного АВПМ были опробованы также клеи другой химической природы и вибропоглощающий слой (Витур-0433-85 С) на основе полиэфира с молекулярной массой 1000.

Таблица 3.20 - Прочность клеевых соединений вибропоглощающего слоя с алюминиевым сплавом, выполненных с применением клеев холодного отверждения

№№ п.п.	Клеевая композиция	Режим отверждения	Температура испытания, °С	Прочность при отслаивании, Н/мм
1	эпоксидная	20 °С	20	2,9
2	эпоксидная	60 °С	20	2,6
3	эпоксидная	20 °С	80	0,7
4	полиуретановая	20 °С	20	2,2
5	полиуретановая	100 °С	20	2,0
6	полиуретановая	20 °С	80	0,5

Были выбраны 4 варианта экспериментальных составов разрабатываемого слоистого армированного вибропоглощающего материала, включавшие в качестве вибропоглощающего слоя - лист Витур Т-0533-90С или Витур Т-0433-85С толщиной 1,5 мм, армирующего - лист Д16АТ толщиной 0,45 мм и клеевую композицию на основе бутадиен-нитрильного каучука или кремнийорганического каучука для их соединения между собой.

С целью исключения стадий нагрева и сушки из технологического процесса для работы были выбраны клеи холодного отверждения: ВКР-27 (на основе бутадиен-нитрильного каучука), ВКР-24 (на основе полиуретанового каучука) и ВКР-86 (на основе кремнийорганического каучука).

Из представленных в таблице 3.21 данных следует, что независимо от марки используемого термоэластопласта наибольшие значения прочности при отслаивании имеют образцы клеевых соединений, полученные с использованием клея ВКР-27, а наименьшие соответствуют клею ВКР-24.

Следует отметить, что уровень прочности связи между слоями экспериментальных образцов классического АВПМ ниже в сравнении с образцами алюмотермоэластопласта.

Таким образом, для соединения полиуретанового вибропоглощающего и армирующего металлического слоев с целью создания слоистого АВПМ предпочтительно использовать эпоксидный клей или клей на основе бутадиен-нитрильного каучука.

Таблица 3.21 - Прочность клеевых соединений вибропоглощающих слоев и листа из Д16АТ

Вибропоглощающий слой	Клеевой слой	$\sigma_{отел.}$ при 20 °С, Н/мм
Витур Т-0533-90С	Клей ВКР-27	2,00
	Клей ВКР-24	0,90
	Клей ВКР-86	1,20
Витур Т-0433-85С	Клей ВКР-27	1,90
	Клей ВКР-24	0,45
	Клей ВКР-86	1,50

Таблица 3.22 – Прочность при отслаивании термоэластопласта от алюминиевого сплава экспериментальных образцов вибропоглощающего алюмотермоэластопласта в зависимости от режима прессования

Температура, °С	$P_{уд.}$ МПа	$\sigma_{отел.}^*$ Н/мм (среднее значение)	
		$T_{исп.}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{исп.}=80\text{ }^{\circ}\text{C}$
150	0,25	0,71	-
		1,22	-
	0,5	1,44	-
		1,59	-
	1,0	2,42	-
		2,64	-
160	0,25	4,17	-
	0,5	5,37	-
		6,20	1,0
	1,0	5,46	-
		6,00	-
170	0,25	3,78	-
	0,5	2,29	-
		2,10	-
	1,0	1,60	-
		1,50	-

**приведены данные для двух вариантов времени выдержки под давлением*

Исследовано влияние технологических параметров режима прессования и использование активатора поверхности на прочность связи между слоями АВПМ с металлическим армирующим слоем. Результаты определения прочности при отслаивании экспериментальных образцов слоистого вибропоглощающего алюмотермоэластопласта, изготовленных при различных режимах способом прямого контактного горячего прессования, приведены в таблице 3.22.

Из представленных в таблице 3.22 данных видно, что за исключением образцов, изготовленных при $T_{пр.}=170\text{ }^{\circ}\text{C}$, прочность связи между слоями возрастает при повышении температуры и давления прессования. Максимальную прочность при отслаивании $\sigma_{отсл.}=6,2\text{ Н/мм}$ при температуре испытаний $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ имеют образцы, полученные при следующем режиме прессования: $T=+160\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{уд.}=0,5\text{ МПа}$.

Для сравнения в таблице 3.23 приведены результаты определения прочности при отслаивании ($\sigma_{отсл.}$) и толщины вибропоглощающего слоя термоэластопласта от алюминиевого сплава экспериментальных образцов классического двухслойного АВПМ, изготовленных при различных температуре и давлении прессования.

Таблица 3.23 - Прочность при отслаивании при $T = (23\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ и толщина экспериментальных образцов АВПМ в зависимости от параметров режима прессования.

Вибропоглощающий слой	$T_{пр.},\text{ }^{\circ}\text{C}$	$P_{уд.},\text{ МПа}$	$\sigma_{отсл.},\text{ Н/мм}$	Толщина, мм
Витур Т-0533-90С	170	0,25	<u>6,70</u> 3,20-9,00	<u>1,70</u> 1,45-1,90
		0,5	<u>7,50</u> 5,60-8,00	<u>1,34</u> 1,30-1,37
	165	0,25	<u>7,80</u> 3,90-10,90	<u>1,84</u> 1,74-1,90
		0,5	<u>7,90</u> 7,50-9,30	<u>1,77</u> 1,75-1,78
	160	0,25	<u>6,30</u> 5,40-7,30	<u>1,87</u> 1,83-1,90
		0,5	<u>6,70</u> 4,20-8,80	<u>1,82</u> 1,80-1,85
Витур Т-0433-85С	165	0,25	<u>7,60</u> 6,50-10,20	<u>1,85</u> 1,80-1,90
		0,5	<u>7,50</u> 5,30-8,50	<u>1,76</u> 1,75-1,76
	160	0,25	<u>5,15</u> 4,80-5,50	<u>1,90</u> 1,85-1,92
		0,5	<u>5,60</u> 5,20-6,00	<u>1,76</u> 1,75-1,76

Из приведенных в таблице 3.23 данных следует, что оптимальное сочетание максимальных значений прочности при отслаивании ($\sigma_{отсл.}=7,6 - 7,8\text{ Н/мм}$) и минимального

выдавливания термоэластопласта (облоя), определяемого толщиной отпрессованных образцов, наблюдается при температуре прессования 165 °С и удельном давлении $P_{уд.} = 0,25$ МПа. При этом данные показатели не зависят от марки термоэластопласта, используемого в качестве вибропоглощающего слоя.

Результаты исследования прочности при отслаивании вибропоглощающего слоя от алюминиевого сплава образцов этого же материала при температуре +80 °С приведены в таблице 3.24.

Как видно из приведенных результатов, в данном случае прочность связи между слоями значительно ниже, чем при испытании аналогичных образцов при 20 °С. Однако следует отметить, что ее величина находится на уровне максимального значения межслойной адгезии образцов соответствующих клеевых соединений (2,00 Н/мм), исследованных при комнатной температуре (см. таблицу 3.21).

Таблица 3.24 - Прочность при отслаивании вибропоглощающего слоя от алюминиевого сплава при +80 °С

№ п.п.	Способ изготовления образца	Состав полимерных слоев	$\sigma_{отсл.}$ Н/мм
			+80 °С
1	Прессование при T=165 °С	Витур Т-0533-85С	1,15
2	Прессование при T=165 °С	Витур Т-0433-85С	1,10

В то же время из сравнения данных таблиц 3.20 и 3.22 прочность при отслаивании при температуре испытаний 80 °С экспериментальных образцов алюмотермоэластопласта составляет 1,0 Н/мм, что превышает прочность при отслаивании образцов, полученных при склеивании эпоксидным и полиуретановым клеями, в 1,4 и 2,1 раза соответственно.

Для повышения адгезии между слоями слоистого материала могут быть использованы активаторы поверхности. Влияние активатора поверхности на величину межслойной адгезии при различных режимах прессования экспериментальных образцов двухслойного АВГМ классического состава продемонстрировано в таблице 3.25. В качестве активатора поверхности были использованы растворы продукта АГМ-9 в этилацетате (ЭА) различной концентрации. Обработке подвергалась поверхность вибропоглощающего слоя.

Из таблицы 3.25 видно, что оптимальной является 5% концентрация раствора продукта АГМ-9, обеспечивающая незначительный расход вещества и практически во всех случаях наибольшую адгезию между слоями термоэластопласта и алюминиевого сплава марки Д16-АТ.

Полученные результаты свидетельствуют также о том, что прочность при отслаивании ($\sigma_{отсл.}$) образцов, обработанных 5% раствором АГМ-9 в этилацетате и отпрессованных по

режиму $T = +165\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{уд}} = 0,25\text{ МПа}$, составляет в среднем $8,0\text{ Н/мм}$ и не зависит от марки термоэластопласта.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в значительной степени прочность связи между слоями слоистых АВПМ определяется как технологическими параметрами режима их изготовления, так и составом их слоев. К основным технологическим параметрам процесса их изготовления, которые могут оказать влияние на величину межслойной адгезии, относятся температура и удельное давление прессования.

Таблица 3.25 - Прочность при отслаивании экспериментальных образцов после активации поверхности термоэластопластов

Вибропоглощающий слой (марка ТЭП)	$T_{\text{пр}},\text{ }^{\circ}\text{C}$	Концентрация раствора активатора поверхности в этилацетате, % масс.	$\sigma_{\text{отсл.}},\text{ Н/мм}$ при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Витур Т-0533-90С	170	10	<u>6,7</u> 3,2-9,0
		5	<u>7,9</u> 6,8-8,5
	165	10	<u>7,8</u> 3,9-10,9
		5	<u>8,0</u> 7,6-8,6
		2,5	<u>7,1</u> 3,5-8,0
	160	10	<u>6,3</u> 5,4-7,3
		5	<u>6,0</u> 5,8-7,2
Витур Т-0433-85С	165	10	<u>7,6</u> 6,5-10,2
		5	<u>8,0</u> 6,8-8,2
		2,5	<u>8,0</u> 4,6-8,3
	160	10	<u>5,15</u> 4,80-5,50
		5	<u>5,10</u> 3,90-7,50

Для подтверждения данного предположения рассмотрены результаты определения прочности связи между слоями экспериментальных образцов многослойного армированного вибропоглощающего материала с улучшенными упруго-массовыми характеристиками, представленные в таблице 3.26. Состав экспериментальных образцов и их внешний вид приведены в разделе 2.1 «Объекты исследования» (рисунок 2.1.3).

Как уже было показано ранее, для всех исследованных образцов прочность при отслаивании ($\sigma_{отсл.}$) возрастает с увеличением давления и температуры прессования и достигает максимальных значений при оптимальных соотношениях данных параметров, например, для образцов варианта №3: при $T_{пр.}=170\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P_{уд.}=0,5\text{ МПа}$ $\sigma_{отсл.}=2,60\text{ Н/мм}$, для образцов варианта №4: при $T_{пр.}=165\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $P_{уд.}=0,2\text{ МПа}$ $\sigma_{отсл.}=4,50\text{ Н/мм}$. То есть наблюдается зависимость межслойной адгезии как от состава, так и от структуры экспериментальных образцов.

Таблица 3.26 - Прочность связи между слоями при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ экспериментальных образцов многослойного армированного вибропоглощающего материала с улучшенными упруго-массовыми характеристиками

Вариант состава	Технологические параметры прессования		Прочность при отслаивании, Н/мм
	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Удельное давление, МПа	
Вариант №1	165	0,25	8,1
Вариант №2	165	0,25	5,1
Вариант №3	165	0,25	0,15
	165	0,5	1,15
	170	0,3	2,02
	170	0,5	2,60
Вариант №4	165	0,2	4,50
	165	0,1	4,12
	160	1	2,68
	155	0,1	1,72
	150	0,1	1,04
	150	0,2	1,31
Вариант №5	165	0,25	0,50*
	165	0,25	0,21

**обработка активатором поверхности*

Для образцов варианта №5 (см. таблицу 3.26) увеличение межслойной адгезии наблюдается при дополнительной обработке соединяемых слоев активатором поверхности.

Поскольку армирующий слой в данном случае представляет собой перфорированный лист, в котором перфорация составляла $\approx 47\%$, то соответственно уменьшается площадь контактирующих поверхностей, что сказывается на величине прочности при отслаивании ($\sigma_{отсл.}=0,50$ Н/мм) по сравнению с другими вариантами состава. Повышение давления или температуры прессования приводило в данном случае к выдавливанию полимерного слоя через отверстия в армирующем слое.

Образцы вариантов состава 1 и 2 имеют межслойную адгезию на уровне образцов классического двухслойного АВПМ, изготовленных прессовым способом, в то время как образцы вариантов 3-5 характеризуются значительно меньшими показателями $\sigma_{отсл.}$. Очевидно, это объясняется отличием трех последних образцов от классического материала по структуре и толщине входящих в его состав слоев.

В итоге проведенных исследований по влиянию способа изготовления АВПМ на прочность связи между его слоями установлено преимущество технологии изготовления армированных вибропоглощающих материалов способом прессования по сравнению со склеиванием.

Представленные данные также подтверждают, что на свойства результирующего слоистого материала оказывают влияние технологические параметры режима прессования и конфигурация образцов материалов, как уже было отмечено выше. Эффективным способом повышения межслойной адгезии является применение активатора поверхности.

Рассмотрено влияние состава многослойного АВПМ, в частности толщин слоев и порядка их расположения относительно друг друга, на прочность связи между его слоями.

Данные, представленные в таблице 3.26, подтверждают, что наибольшее значение межслойной адгезии имеют образцы варианта №1 $\sigma_{отсл.}=8,10$ Н/мм, а изготовленные по аналогичному режиму образцы вариантов №2 и 4 имеют меньшие показатели $\sigma_{отсл.}=5,1$ и $4,5$ Н/мм соответственно. Можно предположить, что меньшее значение прочности при отслаивании образцов варианта №4 в сравнении с вариантом №1 объясняется недостаточной длиной непрерывного участка для проведения исследования, в силу особенностей конфигурации армирующего слоя (состоит из трех частей длиной 120 мм каждая).

Стоит отметить, что при исследовании образцов вариантов №2 и №3 при отслаивании происходил разрыв армирующего слоя (в качестве которого используется алюминиевая фольга толщиной 0,3 и 0,1 мм соответственно), т.е. разрушение имеет когезионный характер, чем и обусловлено снижение показателя межслойной адгезии.

По величине прочности связи между армирующим и вибропоглощающим слоями традиционным ВПМ – двухслойному марки ВТП-4В и алюмотермоэластопласту – соответствуют только экспериментальные образцы варианта №1 (8,1 вместо 7,8 и 6,2 Н/мм), в

то время как варианты №№ 3 и 5 имеют $\sigma_{отсл.}$ значительно ниже (2,6 и 0,5 Н/мм). В последнем случае из-за наличия перфорации не прослеживается увеличения межслойной адгезии.

Из анализа представленных данных можно сделать вывод, что на величину прочности связи между слоями АВПМ оказывают влияние не только параметры технологического процесса изготовления, но и толщины исходных слоев слоистого материала. Однако из-за разрыва слоев малых толщин при расслаивании АВПМ не всегда удастся установить четкую зависимость между этими параметрами. Поэтому для обеспечения высокого уровня адгезии между слоями требуется комплексный подход для подбора данных характеристик АВПМ экспериментальным путем.

Таблица 3.27 – Поверхностная плотность экспериментальных образцов слоистого вибропоглощающего алюмотермоэластопласта, изготовленных способами склеивания и прессования.

№ состава	Состав образца	Толщина слоев, мм	Толщина образца*, мм	Поверхностная плотность, кг/м ²	
				Прессование	Склеивание*
1	Сплав 1441 ВТП-1В Сплав 1441	0,32 0,55 0,32	-	2,25	-
2	Сплав 1441 ВТП-1В Сплав 1441	0,32 0,75 0,32	1,68	2,55	2,80
3	Сплав 1441 ВТП-1В Сплав 1441	0,32 1,00 0,32	1,83	2,85	3,15
4	Сплав 1441 ВТП-1В Сплав 1441	0,32 1,50 0,32	-	3,46	-
5	Сплав 1441 ВТП-1В Сплав 1441	0,44 0,55 0,44	1,78 1,82	3,00	3,10 3,20
6	Сплав 1441 ВТП-1В Сплав 1441	0,44 0,75 0,44	-	3,15	-
7	Сплав 1441 ВТП-1В Сплав 1441	0,44 1,00 0,44	-	3,40	-
8	Сплав Д16АТ ВТП-1В Сплав Д16АТ	0,44 0,55 0,44	1,80 1,85	3,15	3,25 3,40
9	Сплав Д16АТ ВТП-1В Сплав Д16АТ	0,44 0,75 0,44	-	3,30	-

*в зависимости от вида используемого клея

Рассмотрено влияние способа изготовления на свойства АВПМ. Результаты исследования толщины и поверхностной плотности экспериментальных образцов слоистого вибропоглощающего алюмотермоэластопласта с различным сочетанием слоев, изготовленных по выбранным оптимальным режимам прессования и склеивания, представлены в таблице 3.27.

Из представленных в таблице 3.27 данных следует, что поверхностная плотность экспериментальных образцов вибропоглощающего алюмотермоэластопласта, изготовленных способом склеивания, находится в пределах (2,80–3,40) кг/м², а отпрессованных образцов – (2,25–3,46) кг/м². При этом для образцов аналогичного состава, но изготовленных разными способами, можно проследить превосходство по массе образцов, содержащих клеевую прослойку, на 0,1–0,3 кг по сравнению с отпрессованными.

Результаты исследования поверхностной плотности экспериментальных образцов АВПМ классического состава, состоящего из слоя термоэластопласта марок Витур Т, алюминиевого листа Д16АТ и клеевых слоев различной химической природы, приведены в таблице 3.28.

Таблица 3.28 - Поверхностная плотность экспериментальных образцов листового композиционного вибропоглощающего материала

№ обр.	Термоэластопласт (ВитурТ-0533-90С, Витур Т-0433-85С)		Клеевая композиция		Поверхностная плотность слоистого материала, кг/м ²
	Толщина, мм	Масса 1 м ² , кг	Марка	Масса 1 м ² , кг	
1	1,5	1,60	ВКР-24	0,05-0,07	2,98
2	1,5	1,60	ВКР-27	0,12-0,13	3,00
3	1,5	1,60	ВКР-86	0,20-0,22	3,10
4	1,5	1,60	двойной слой ВКР-86	0,40-0,44	3,30

Из данных, приведенных в таблице 3.29, видно, что по величине поверхностной плотности экспериментальные образцы данного вибропоглощающего материала находятся на уровне экспериментальных образцов алюмотермоэластопласта, полученных способом склеивания (см. таблицу 3.27), а максимальный привес образца наблюдается при использовании клея ВКР-86 и составляет 0,20÷0,44 кг/м².

Таким образом, анализ представленных выше данных подтверждает преимущество технологии прессования в сравнении со склеиванием.

Способ изготовления ВПМ оказывает влияние и на его вибропоглощающие свойства. В таблице 3.29 приведены результаты сравнения коэффициентов механических потерь экспериментальных образцов двухслойного АВПМ, полученных способами склеивания и прессования, при различных температурах и частоте 100 Гц. Образцы для испытаний

приклеивались к подложке, моделирующей вибрирующую поверхность, при помощи тех же клеев, что и использованных для изготовления экспериментальных образцов клеевым способом. Из представленных данных следует, что экспериментальные образцы, изготовленные как прессовым способом, так и приклеенные к подложке клеями ВКР-24 и ВКР-27, имеют близкие показатели КМП и превосходят по этому показателю образцы, соединенные с подложкой клеем ВКР-86, как уже было показано выше.

Таблица 3.29 - Коэффициент механических потерь экспериментальных образцов двухслойного АВПМ на подложке из металла (метод трехточечного изгиба)

Состав образца	Способ изготовления образца	Клеевая композиция для приклеивания к подложке	tgδ при 100 Гц и температуре		
			- 60 °С	20 °С	80 °С
Д16АТ толщиной 0,45 мм Витур Т-0533-90С толщиной 1,5 мм	прессовый	ВКР-27	0,04	0,22	0,09
		ВКР-24	0,03	0,21	0,04
		ВКР-86	0,014	0,080	0,030
Д16АТ толщиной 0,45 мм Клей ВКР-27 Витур Т-0533-90С толщиной 1,5 мм	клеевой	ВКР-27	0,03	0,14	0,03
Д16АТ Толщиной 0,45 мм Клей ВКР-24 Витур Т-0533-90С толщиной 1,5 мм	клеевой	ВКР-24	0,015	0,170	0,029
Д16АТ толщиной 0,45 мм Клей ВКР-86 Витур Т-0533-90С толщиной 1,5 мм	клеевой	ВКР-86	0,023	0,070	0,035

Аналогичная зависимость сохраняется и для слоистых конструкций, полученных в результате склеивания экспериментальных образцов с подложками – наибольшие и близкие показатели tgδ при указанных температурах имеют образцы, полученные с использованием клеев ВКР-24 и ВКР-27. При этом независимо от вида использованного клея для соединения с подложкой все они уступают образцам, полученным прессовым способом. Причина

полученного эффекта может заключаться в структуре слоистых конструкций с подложкой – а именно в порядке расположения клеевых и вибропоглощающих слоев. Вероятно, слой термоэластопласта, дублированный с двумя клеевыми слоями, не проявляет в должной степени вибропоглощающие свойства.

Таким образом, прессовый способ изготовления слоистых ВПМ показал преимущество перед клеевым. Кроме того, клеевая прослойка (состав) и конфигурация (расположения слоев) слоистого АВПМ оказывают влияние на его вибропоглощающие свойства.

3.4. Выбор структуры АВПМ

3.4.1 Влияние структуры слоистого АВПМ на его свойства

Влияние структуры армированных вибропоглощающих материалов и их состава, в частности марки сплава металлического армирующего слоя, на их диссипативные свойства, можно проследить путем сравнения $\text{tg}\delta$ и E' образцов армированного вибропоглощающего материала, включающего слой ТПУ и армирующий слой, и слоистого армированного вибропоглощающего материала типа «сэндвич» - алюмотермоэластопласта, содержащего два армирующих слоя, расположенных симметрично относительно вибропоглощающей прослойки.

Армирующий слой двухслойного вибропоглощающего материала выполнен из сплава алюминиевого сплава Д16АТ, алюмотермоэластопласта – из сплава 1441, при этом указанные материалы имеют равную толщину вибропоглощающих слоев 1,5 мм.

Таблица 3.30 - Демпфирующие свойства образцов вибропоглощающих материалов при различных температурах и частотах

Свойство	Температура и частота испытаний								
	-60 °С			+20 °С			+80 °С		
	100 Гц	200 Гц	300 Гц	100 Гц	200 Гц	300 Гц	100 Гц	200 Гц	300 Гц
Коэффициент механических потерь, $\text{tg}\delta$	Вибропоглощающий алюмотермоэластопласт								
	0,04	0,03	0,02	0,15	0,16	0,17	0,05	0,06	0,07
	Двухслойный вибропоглощающий материал								
	0,05	-	0,05	0,17	-	0,20	0,08	-	0,10
Динамический модуль упругости, E' , ГПа	Вибропоглощающий алюмотермоэластопласт								
	45,0	50,4	55,9	9,8	11,2	12,6	4,9	4,5	4,2
	Двухслойный вибропоглощающий материал								
	42,0	-	45,3	8,5	-	9,5	3,7	-	3,4

Из представленных в таблице 3.30 данных видно, что с повышением частоты испытаний со 100 до 300 Гц коэффициент механических потерь образцов алюмотермоэластопласта возрастает за исключением -60 °С. По данному показателю он уступает образцам двухслойного материала при всех указанных частотах и температурах, что объясняется наличием второго армирующего слоя.

Однако, динамический модуль упругости образцов алюмотермоэластопласта лишь незначительно превышает E' двухслойного АВПМ, содержащего всего один армирующий слой. Вероятно, это может быть связано с небольшой толщиной армирующего слоя: 0,3 мм у алюмотермоэластопласта по сравнению с 0,45 мм у двухслойного материала. Этот показатель также возрастает с понижением температуры и повышением частоты испытаний, что также объясняется термодинамическими свойствами внутренней полимерной прослойки.

Несмотря на то, что коэффициент механических потерь АВПМ практически не зависит от марки сплава металлического армирующего слоя, как было показано выше (см. таблицу 3.7), данный параметр является характеристикой, более чувствительной к изменению структуры армированных вибропоглощающих материалов в сравнении с динамическим модулем упругости.

Влияние структуры на вибропоглощающие свойства (КМП) рассмотрено на примере многослойного слоистого АВПМ с улучшенными упруго-массовыми характеристиками на основе базовых вибропоглощающего слоя из материала ВТП-1В и армирующего слоя из Д16-АТ. Состав образцов различных вариантов приведен в таблице 3.31.

Таблица 3.31 – Состав экспериментальных образцов АВПМ с улучшенными упруго-массовыми характеристиками

№ варианта	Структура	Количество слоев	Толщина слоев, мм	
			Д16-АТ	ВТП-1В
1	вибропоглощающий и армирующий слой (классический АВПМ)	2	0,5	2,0
2	два вибропоглощающих слоя, чередующихся с двумя армирующими слоями	4	0,3	1,0
3	четыре вибропоглощающих слоя, чередующихся с четырьмя армирующими слоями	8	0,1	0,5
4	классический АВПМ	2	0,5 состоит из трех равных частей	2,0
5	классический АВПМ	2	0,5 с перфорацией	2,0

Результаты исследования вибропоглощающих свойств экспериментальных образцов многослойного армированного вибропоглощающего материала показаны в таблице 3.32, откуда следует, что наибольшие значения коэффициента механических потерь имеют экспериментальные образцы варианта №1, то есть классического состава.

По величине коэффициента механических потерь вариант №5 уступает образцам вариантов №№1 и 3 и соответствует варианту №4 с $\text{tg}\delta=0,055$ (при исследовании демпфирующих свойств образцы для испытаний также имели разделенный на три равные части армирующий слой). Образцы варианта №2 по величине демпфирующих свойств находятся на уровне вариантов №№4 и 5, а восьмислойный вариант №3 по величине коэффициента механических потерь превышает показатели образцов вариантов №№2, 4 и 5 на 11-14 %, однако уступает варианту №1 почти на 10 %.

Из приведённых в таблицах 3.31 и 3.32 данных следует, что, вероятно, конфигурация (перфорация, разделение на несколько частей) армирующих слоев образцов вариантов №№4 и 5 приводит к снижению демпфирующих свойств многослойного армированного вибропоглощающего материала.

Из сравнения результатов испытаний четырех- и восьмислойного образцов вариантов №№2 и 3 следует, что более эффективными по комплексу характеристик «поверхностная плотность-демпфирующие свойства» являются образцы варианта №3, очевидно, за счет снижения толщины вибропоглощающего и армирующего слоев и увеличения их количества. Также из представленных данных следует, что за счет перфорации армирующего слоя наименьшую поверхностную плотность (на 20-30 % ниже образцов вариантов состава №№1-4) имеют образцы варианта №5. Наибольшее значение поверхностной плотности имеют образцы варианта №2, они также обладают высокими показателями прочности при отслаивании. Восьмислойный образец №3 имеет среднее значение поверхностной плотности, превосходящее образцы вариантов №№1 и 5, но меньшее, чем у образцов вариантов №№2 и 4.

Таким образом, наличие перфорации оказывает положительное влияние на поверхностную плотность многослойного армированного вибропоглощающего материала.

Из сравнения поверхностной плотности алюмотермоэластопласта и двухслойного АВПМ классического состава с экспериментальными образцами АВПМ следует, что меньшее значение данного показателя имеют только образцы варианта №5, значительно уступающие традиционным ВПМ по комплексу прочих свойств. Образцы вариантов №№1, 3, 4 соответствуют по данному показателю алюмотермоэластопласту и незначительно (на 400-470 г) превышают АВПМ марки ВТП-4В. Поверхностная плотность образца варианта №2 превышает оба упомянутых материала по поверхностной плотности на 400-850 г.

Таблица 3.32 – Вибропоглощающие свойства и поверхностная плотность экспериментальных образцов АВПМ с улучшенными упруго-массовыми характеристиками

Исследованные образцы	Коэффициент механических потерь при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и частоте 100 Гц	Поверхностная плотность, кг/м^2
вариант №1	0,071	3,39
вариант №2	0,057	3,85
вариант №3	0,064	3,44
вариант №4	0,055	3,47
вариант №5	0,055	2,89

Таким образом, наиболее оптимальной структурой АВПМ является классическое сочетание армирующего и вибропоглощающего слоев. Для снижения поверхностной плотности слоистого материала возможно варьировать толщину его слоев, например, использовать в качестве армирующего слоя алюминиевую фольгу, монослой угле-, стеклопластиков или перфорированные листы металла.

3.4.2 Влияние перфорации армирующего и вибропоглощающего слоев на технологические параметры изготовления АВПМ и его свойства

По результатам испытаний экспериментальных образцов АВПМ с улучшенными упруго-массовыми характеристиками, имеющих перфорированный армирующий слой, можно сделать вывод, что наличие перфорации отрицательным образом сказывается на прочности связи между слоями.

Однако исследование ЗИ панели фюзеляжа, облицованной образцами АВПМ с перфорированным армированным слоем, показало повышение звукоизоляции в сравнении с образцами вариантов №№1-4 (см. таблицу 3.31). Таким образом, наилучшим соотношением эффективности к массе в области низких частот обладает материал с перфорированным армирующим слоем (АС), поэтому исследование армированного ВПП с различной степенью перфорации армирующего и вибропоглощающего слоев, является перспективным направлением в области улучшения упруго-массовых характеристик ВПМ.

Перфорация армирующего и вибропоглощающего слоев оказывает влияние не только на свойства АВПМ, но и на технологические параметры его изготовления.

Исследования проводились с использованием образцов 6 вариантов, состав которых приведен в таблице 3.33 и в разделе 2.1 «Объекты исследования», внешний вид изображен на рисунке 2.1.4.

В качестве базового режима процесса прессования экспериментальных образцов ВПП использован режим изготовления варианта состава №5 образца многослойного армированного

вибропоглощающего материала с улучшенными упруго-массовыми характеристиками. Основные технологические параметры данного режима: $T_{пр.}=165\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{уд.}=0,25\text{ МПа}$. В соответствии с данным режимом был изготовлен вариант состава №6 экспериментальных образцов ВПП, для которых в процессе прессования вибропоглощающий слой соединялся с предварительно перфорированным армирующим слоем.

Таблица 3.33 – Состав экспериментальных образцов ВПП различных вариантов

Состав	Толщина, мм		Перфорация площади образца, %		Диаметр отверстий, мм
	Вибропоглоща ющий слой	Армирующий слой	Вибропоглоща ющий слой	Армирующий слой	
1	2	0,5	25	25	4,2
2			50	50	6,0
3	4	0,5	0	0	-
4			25	25	4,2
5			50	50	6,0
6			0	50	6,0

При выборе технологических параметров процесса прессования АВПМ с перфорированными слоями необходимо избегать дефектов, вызванных неверно подобранным давлением и/или температурой прессования образцов, таких как разнотолщинность, коробление на поверхности материала со стороны вибропоглощающего слоя или его выдавливание сквозь отверстия в армирующем слое. Следует отметить, что в данном случае наблюдается интересный эффект – не свойства материала зависят от технологических параметров процесса прессования, как уже было показано ранее, а специфический состав исходных слоев материала определяет выбор температуры и давления прессования.

Перфорация образцов №1 и №2 проводилась уже после изготовления двухслойных полосок ВПП во избежание ухудшения межслойной адгезии и расслоения из-за значительно снизившейся площади контактирующих слоев. Для процесса соединения перфорированных вибропоглощающего и армирующего слоев удельное давление прессования было увеличено в 2 раза и составило 0,5 МПа, при этом остальные параметры изготовления остались прежними. В ходе прессования экспериментальных образцов ВПП состава №№ 3-5 также использовались перфорированные АС и ВПС, но при этом толщина последнего составила 4 мм, что вдвое превосходит показатели вибропоглощающего слоя для составов №№1 и 2. В связи с этим температура прессования была увеличена до $(172 \pm 3)\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Следующим этапом процесса изготовления было выполнение сквозной перфорации слоев (различной степени) по площади изготовленных экспериментальных образцов ВПП составов №№ 1, 2, 4, 5 отверстиями с различным диаметром (4,2 и 6,0 мм - таблица 3.33).

Таблица 3.34 - Технологические параметры процесса прессования экспериментальных образцов ВПП различных вариантов состава

Вариант состава	Толщина, мм		Перфорация, %		Диаметр отверстий, мм	Р _{уд} , МПа	Т _{пр} , °С
	ВПС	АС	ВПС	АС			
1	2	0,5	25	25	4,2	0,5	165±3
2			50	50	6,0		
3	4	0,5	0	0	-	0,5	172±3
4			25	25	4,2		
5			50	50	6,0		
6			0	50	6,0	0,25	165±3

На основании полученных результатов можно вывести следующие закономерности влияния структуры вибропоглощающего покрытия на технологические параметры его изготовления способом прессования:

- с возрастанием толщины ВПС требуется увеличение температуры прессования,
- с увеличением количества перфорированных слоев требуется увеличение удельного давления прессования материала,
- при соединении вибропоглощающего слоя с перфорированным армирующим слоем увеличение температуры или давления прессования нецелесообразно во избежание выдавливания вязкоупругого полимерного слоя через отверстия АС.

Результаты исследования поверхностной плотности, а также влияния перфорации армирующего и вибропоглощающего слоев на прочность связи между слоями и коэффициент механических потерь АВПМ приведены в таблице 3.35. Согласно этим данным, наибольшую поверхностную плотность имеют образцы классического варианта состава №3, что обусловлено использованием ВПС толщиной 4,0 мм и отсутствием перфорации.

Таблица 3.35 – Результаты определения физических, механических, вибропоглощающих свойств экспериментальных образцов вибропоглощающего покрытия

Исследованные образцы	Поверхностная плотность, кг/м ²	Прочность связи между армирующим и вибропоглощающим слоями, Н/мм	Коэффициент механических потерь при Т=20 °С и частоте 100 Гц
вариант №1	2,54	0,32	0,22
вариант №2	1,82	0,25	0,23
вариант №3	5,74	0,51	0,24
вариант №4	4,47	0,29	0,22
вариант №5	3,07	0,21	0,25
вариант №6	5,13	0,23	0,24

Использование перфорированного на 50% армирующего слоя (состав №6) позволяет снизить этот показатель на 10 %. Дальнейшее увеличение степени сквозной перфорации слоев с

25 до 50 % (варианты №№5 и 4 соответственно) ведет к снижению поверхностной плотности экспериментальных образцов с толщиной ВПС 4,0 мм на 30 % - с 4,47 до 3,07 кг/м² (либо на 45% по сравнению с неперфорированным образцом варианта №3). Аналогичная зависимость наблюдается для экспериментальных образцов с толщиной ВПС 2,0 мм (варианты №№1 и 2) – снижение с 2,54 до 1,82 кг/м² на 30 %. Таким образом, поверхностная плотность материала зависит от толщины ВПС и степени перфорации слоев.

Основным показателем качества слоистого ВПП, определяющего не только его монолитность и устойчивость к расслаиванию, но и правильно подобранный технологический режим изготовления, является показатель прочности связи между слоями материала. В таблице 3.35 показано, что наибольшее значение межслойной адгезии (0,51 Н/мм) имеют образцы варианта № 3 благодаря максимальной площади контакта слоев из-за отсутствия перфорации. Увеличение степени перфорации с 25 до 50 % приводит к снижению прочности связи между слоями, что следует из сравнения образцов вариантов состава №№1 и 2, 4 и 5. Увеличение толщины ВПС также приводит к снижению данного показателя – для вариантов состава №№ 1 и 4, 2 и 5 соответственно. Вариант состава №6 превосходит аналог – вариант №5 со сквозной перфорацией, возможно, благодаря дополнительному контакту слоев по контуру отверстий.

Таким образом, увеличение как степени перфорации АС, так и сквозной перфорации слоев, определяемых, в том числе диаметром перфорирующих отверстий, способствует снижению уровня межслойной адгезии за счет уменьшения площади контакта между вибропоглощающим и армирующим слоями ВПП.

Исследовано влияние перфорации армирующего и вибропоглощающего слоев на коэффициент механических потерь АВПМ, для чего был определен $\text{tg}\delta$ при 20 °С и частоте 100 Гц.

Из сравнения КМП экспериментальных образцов ВПП вариантов состава №№ 1 и 2, 4 и 5 следует, что увеличение степени сквозной перфорации АС и ВПС приводит к возрастанию демпфирующих свойств. Вероятно, это вызвано большей гибкостью и способностью к диссипации вибрационной энергии образцов указанных составов. При этом значения КМП экспериментальных образцов с различной толщиной и одинаковой степенью перфорации отличаются только при степени перфорации 50% (варианты состава №№ 2 и 5) и не отличаются для образцов вариантов состава №№1 и 4 ($\text{tg}\delta=0,22$). Наибольшее значение коэффициента механических потерь имеет вариант состава № 5.

Вариант №3 классического состава АВПМ имеет КМП=0,24, что превышает показатели для №№1 и 2 благодаря большей толщине ВПС, но одновременно уступает образцу варианта состава №5 - также, вероятно, из-за отсутствия перфорации, обуславливающей большую

гибкость указанного аналога. Такое же значение $\operatorname{tg}\delta=0,24$ имеет вариант состава №6, содержащий перфорированный АС.

Таким образом, перфорация армирующего слоя не приведет к снижению вибропоглощающих свойств, как предполагалось ранее, а увеличение степени сквозной перфорации АС и ВПС ведет к возрастанию КМП.

Следует отметить, однако, что при сравнении КМП образцов различного состава необходимо учитывать толщину ВПС, наличие сквозной перфорации и степени перфорации АС.

3.4.3 Влияние количества слоев на вибропоглощающие свойства многослойного АВПМ

Из литературных данных известно, что на величину коэффициента механических потерь многослойного вибропоглощающего материала оказывает влияние количество слоев. Проведено исследование диссипативных свойств методом ДМА в условиях сдвигового нагружения образцов слоистого АВПМ различного состава, включающего, в том числе в качестве демпфирующих слоев однослойный ВПМ марки ВТП-1В.

Таблица 3.36 - Влияние количества слоев на коэффициент механических потерь слоистого АВПМ

Состав	Толщина, мм	tgδ при частоте	
		100 Гц	1000 Гц
ВТП-1В	0,55-0,7	0,20	0,26
ВТП-1В +фольгопласт	0,73	0,22	0,26
ВТП-1В+ ВПС-2,5 +фольгопласт	1,5	0,40	0,38
ВТП-1В +фольгопласт + ВТП-1В + фольгопласт	1,45	0,25	0,27
Фольгопласт + ВПС-2,5 + фольгопласт +ВПС-2,5	1,53	0,31	0,27

В таблице 3.36 представлены результаты исследования КМП различных сочетаний материалов исходных слоев. Сочетание ВТП-1В с фольгопластом приводит к незначительному повышению коэффициента потерь по сравнению с однослойным ВТП-1В. Четырехслойный материал на основе двух слоев ВТП-1В и двух слоев фольгопласта (с ячейками 5х50) превосходит упомянутый выше двухслойный материал по величине тангенса угла механических потерь при частоте 100 Гц, а при частоте 1000 Гц практически совпадает с ним. Очевидно, что на диссипативные характеристики оказывает большое влияние количество слоев в составе вибропоглощающего материала.

Четырехслойный материал, в котором слой ВТП-1В заменен на слой из поливинилацетатной пленки ВПС-2,5, при повышенных частотах имеет $\text{tg}\delta$, аналогичный полиуретановому слою.

Можно сделать вывод, что наиболее высокие диссипативные свойства имеет трехслойный вибропоглощающий материал, содержащий ВТП-1В, фольгопласт и поливинилацетатную пленку ВПС-2,5 в качестве исходных слоев. Трехслойный материал превосходит четырехслойный по коэффициенту потерь, вероятно, благодаря тому, что в его составе имеются две полимерные прослойки, каждая из которых вносит свой вклад в диссипацию энергии. Дальнейшее увеличение количества слоев, очевидно, приведет к повышению $\text{tg}\delta$, но вместе с тем отрицательным образом скажется на массе материала.

Таким образом, анализ результатов исследований позволяет сформулировать основные принципы разработки слоистых АВПМ на основе термоэластопластов и органических волокон:

- максимальное значение коэффициента механических потерь ВПМ соответствует области температуры стеклования полимера, из которого он изготовлен;
- сочетание полимерных слоев, имеющих максимумы вибропоглощения в различных температурных областях, позволяет регулировать температурный диапазон вибропоглощения слоистых материалов;
- коэффициент механических потерь слоистого ВПМ не является аддитивной величиной и не является суммой $\text{tg}\delta$ материалов отдельных слоев;
- армированные вибропоглощающие материалы по демпфирующим свойствам являются более эффективными по сравнению с однослойными вибропоглощающими покрытиями;
- конфигурация расположения армирующего и вибропоглощающего слоев оказывает влияние на демпфирующие свойства АВПМ;
- природа армирующего слоя оказывают влияние на демпфирующие свойства АВПМ;
- на величину коэффициента механических потерь вибропоглощающих материалов с композиционным армирующим слоем оказывает влияние его состав - природа наполнителя и направление выкладки композиционного армирующего слоя;

- наибольшие значения коэффициента механических потерь соответствуют углу выкладки армирующего наполнителя композиционного АС 90°;

- коэффициент механических потерь АВПМ практически не зависит от марки сплава металлического армирующего слоя;

- коэффициент механических потерь является характеристикой более чувствительной к изменению структуры армированных вибропоглощающих материалов в сравнении с динамическим модулем упругости;

- увеличение степени сквозной перфорации армирующего и вибропоглощающего слоев приводит к возрастанию демпфирующих свойств АВПМ;

- испытание методом ДМА в условиях трехточечного изгиба наиболее приближено к реальным условиям работы элементов конструкции сложных технических систем;

- межслойная адгезия слоистого АВПМ определяется технологическими параметрами процесса его изготовления, химической природой, структурой и толщиной соединяемых слоев. Эффективным способом повышения межслойной адгезии является применение активатора поверхности. Для обеспечения высокого уровня адгезии между слоями требуется комплексный подход для подбора данных характеристик АВПМ экспериментальным путем;

- в случае использования перфорированных материалов армирующего (АС) и вибропоглощающего (ВПС) слоев их специфическая структура определяет выбор технологических параметров процесса изготовления АВПМ:

- с возрастанием толщины ВПС требуется увеличение температуры прессования,

- с увеличением количества перфорированных слоев требуется увеличение удельного давления прессования материала,

- при соединении вибропоглощающего слоя с перфорированным армирующим слоем увеличение температуры или давления прессования нецелесообразно;

- поверхностная плотность АВПМ зависит от толщины, структуры (например, перфорации), количества его слоев, корректно подобранных технологических параметров процесса изготовления (наличие облоя и выпрессовок);

- прессовой способ изготовления АВПМ является более предпочтительным по сравнению с методом склеивания;

- наличие клеевых слоев оказывает влияние на поверхностную плотность и вибропоглощающие свойства АВПМ;

Выявленные выше закономерности использованы при разработке вибропоглощающего материала марки ВТП-3В и полимерного композиционного материала марки ВТП-1-ВД с интегрированным вибропоглощающим слоем.

3.5. Термостойкий слоистый вибропоглощающий материал и исследование его свойств

Для поверхностей элементов конструкции сложных технических систем, подверженных одновременному воздействию вибрации и высоких температур, например, воздухопроводов-отопителей, крышек двигательных отсеков, потолочных панелей вертолетов и т.д. требуется вибропоглощающий материал с повышенной температурой эксплуатации до 180 °С. При этом он также должен отвечать стандартным требованиям, предъявляемым к ВПМ авиационного назначения: иметь низкую поверхностную плотность, высокий коэффициент механических потерь, быть работоспособным при -60 °С и не поддерживать горение.

3.5.1 Исследование влияния состава слоев на свойства слоистого термостойкого вибропоглощающего материала

Для изготовления экспериментальных образцов вибропоглощающего материала в качестве исходных материалов для армирующих слоев были выбраны ткани и нетканые полотна из полимерных и стеклянных волокон, пленка на основе сополимера тетрафторэтилена для вибропоглощающего слоя (таблица 2.1.1 раздела 2.1 «Объекты исследования»). Экспериментальные образцы вибропоглощающего материала состояли из трех и пяти слоев, включающих ткань СВМ из арамидных волокон, нетканое полотно из арамидных или арселеновых волокон, стеклоткань марки Т-10-14 из волокон алюмоборосиликатного состава и вибропоглощающего слоя из фторопластовой пленки, служащего также для соединения армирующих слоев.

Результаты исследования физических свойств и горючести экспериментальных образцов вибропоглощающего материала представлены в таблице 3.37.

Несмотря на то, что поверхностная плотность слоистого материала зависит от массы 1 м² исходных материалов и количества слоев, толщина слоистых материалов, изготавливаемых способом прессования, не всегда подчиняется данному правилу, в особенности, когда в качестве исходных слоев используются волокнистые и нетканые материалы с полимерным связующим (таблицы 2.1.1 и 3.37).

Все исходные материалы, за исключением арселеновой ткани IC144, относятся к категории трудносгорающих или самозатухающих и, следовательно, обеспечивают выполнение требований по категории горючести. Таким образом, подтверждаются выводы о зависимости физических свойств слоистых материалов от природы и свойств их исходных слоев и технологии изготовления. Горючесть слоистого материала также определяется составом компонентов исходных слоев, при этом сочетание с одним из компонентов пониженной категории горючести приводит к понижению категории горючести всего слоистого ВПМ.

Таблица 3.37 - Физические свойства и горючесть экспериментальных образцов термостойкого вибропоглощающего материала

Состав образцов	Толщина, мм	P, кг/м ²	Горючесть		
			$\tau_{\text{ост}}$ сек	h прог. мм	Категория
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон	<u>1,2</u> 1,1–1,3	0,84–0,85	0	0–2	Трудногоряющий
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки АОМ	<u>0,9</u> 0,8–1,0	0,74–0,76	0	2–4	Трудногоряющий
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки НТМ-А	<u>1,2</u> 1,1–1,3	0,78–0,80	0	1	Трудногоряющий
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон	<u>0,9</u> 0,8–1,0	0,61–0,63	0–5	9–10	Самозатухающий
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки АОМ	<u>0,7</u> 0,6–0,8	0,55–0,60	0	7–11	Трудногоряющий
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки НТМ-А	<u>1,0</u> 0,9–1,1	0,57–0,63	0	2–3	Трудногоряющий
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон армированный	<u>0,9</u> 0,8–1,0	0,77–0,78	8–11	10	Самозатухающий
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон армированный	<u>1,2</u> 1,1–1,2	0,90–0,93	7	5	Самозатухающий

Межслойная адгезия экспериментальных образцов вибропоглощающего материала оценивалась по показателю прочности при расслаивании (прочность связи между слоями), который определялся методом отслаивания слоев ткани и нетканого полотна от фторопластовой пленки. Результаты исследования межслойной адгезии экспериментальных образцов вибропоглощающего материала приведены в таблице 3.38, из которой следует, что прочность при расслаивании экспериментальных образцов от ткани СВМ арт.86-130-02 ($\sigma_{\text{рассл.}} = 9,5\text{--}19$ Н/см) выше, чем в случае использования ткани СВМ арт.86-294-05ВО ($\sigma_{\text{рассл.}} = 1\text{--}1,5$ Н/см).

Таблица 3.38 - Прочность при расслаивании экспериментальных образцов термостойкого вибропоглощающего материала

Состав образцов	$\sigma_{\text{рассл}}$, Н/см при расслаивании от	
	ткани СВМ	нетканого полотна
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон	9,5	6,0 (расслаивание нетканого полотна)
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки АОМ	11,6	1,1 (расслаивание нетканого полотна)
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки НТМ-А	11,3	<0,4 (расслаивание нетканого полотна)
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон	1,0	6,7 (расслаивание нетканого полотна)
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки АОМ	1,5	3,4 (расслаивание нетканого полотна)
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки НТМ-А	1,2	<0,4 (расслаивание нетканого полотна)
Ткань СВМ арт.86-294-05ВО Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон армированный	1,3	20,0 (разрыв пленки)
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон армированный	19,0	20,0 (разрыв пленки)

Прочность связи между слоями нетканого полотна и фторопластовой пленки выше межслойной прочности самих нетканых полотен, поэтому при испытании происходило расслаивание нетканых полотен за исключением армированного полотна из волокна Арселон, поскольку оно имеет более высокую прочность при расслаивании по сравнению с неткаными полотнами из волокна СВМ (1,1-3,4 Н/см и $\sigma_{\text{рассл}} < 0,4$ Н/см для тканей из волокна СВМ марки АОМ и НТМ-А соответственно). Прочность при расслаивании неармированного полотна Арселон $\sigma_{\text{рассл}} = 6,0-6,7$ Н/см, а армированного полотна Арселон $\sigma_{\text{рассл}} \geq 20$ Н/см. Таким образом, данное свойство слоистого ВПМ также, как и горючесть в первую очередь определяется составом исходных слоев.

Таблица 3.39 - Результаты определения диссипативных свойств экспериментальных образцов термостойкого вибропоглощающего материала при 20 °С и частоте 1000 Гц

Состав образца	$\text{tg}\delta$	E' , МПа	E'' , МПа
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон	0,18	104,70	18,80
Ткань СВМ арт.86-130-02 Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки АОМ	0,21	96,30	20,20
Ткань СВМ арт.86-294-05 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон Фторопластовая пленка Ткань СВМ арт.86-294-05	0,11	62,70	6,90
Ткань СВМ арт.86-294-05 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон	0,10	30,60	2,75
Стеклоткань Т-10-14 Фторопластовая пленка Нетканое полотно Арселон	0,021	233,0	4,89
Стеклоткань Т-10-14 Фторопластовая пленка Нетканое полотно СВМ марки АОМ	0,14	12,62	1,77

Результаты исследований диссипативных свойств экспериментальных образцов вибропоглощающего материала в условиях динамического сдвигового нагружения приведены в таблице 3.39.

Пятислойные образцы имеют низкие диссипативные свойства независимо от их структуры – симметричной (с использованием ткани СВМ арт.86-294-05 и нетканого полотна Арселон) или состава на основе трехслойного образца, дублированного с фторопластовой пленкой и нетканым полотном Арселон. Вероятно, полученный результат может быть связан с недостаточной подвижностью волокон ткани СВМ арт.86-294-05, которая, однако, не дает монолитных соединений с фторопластовой пленкой (см. таблицу 3.38).

Экспериментальные образцы с армирующим слоем из стеклоткани Т-10-14 имеют как минимальные значения диссипативных свойств (в соединении с нетканым полотном Арселон), так и промежуточные их показатели (с нетканым полотном марки АОМ).

Результаты исследований, представленные в таблице 3.39, показывают, что лучший комплекс диссипативных свойств (модуль упругости $E'=96,3-104,7$ МПа, модуль потерь $E''=18,8-20,2$ МПа и $\text{tg}\delta=0,18-0,21$) имеют трехслойные образцы, включающие армирующие

слои из ткани СВМ арт.86-130-02, нетканого полотна из арселоновых или СВМ (арамидных) волокон.

Для оценки их работоспособности при минимальной и максимальной температуре эксплуатации определен их коэффициент механических потерь при -60 и 180 °С. Результаты исследований представлены в таблице 3.40, откуда следует, что они имеют высокие значения коэффициента механических потерь при указанных температурах, что подтверждает их работоспособность в диапазоне температур от -60 до 180 °С.

Таблица 3.40 - Коэффициент механических потерь экспериментальных образцов термостойкого вибропоглощающего материала при температурах -60 и 180 °С и частоте 1000 Гц

Состав образцов	tgδ при температуре	
	-60 °С	$+180$ °С
Ткань СВМ арт. 86-130-02, Фторопластовая пленка Нетканый материал из волокна Арселон	0,20	0,13
Ткань СВМ арт. 86-130-02, Фторопластовая пленка Нетканый материал из волокна СВМ марки АОМ	0,13	0,12

Дальнейшие исследования проводились на экспериментальных образцах ВПМ на основе ткани СВМ и нетканого полотна Арселон, поскольку они имеют большие показатели КМП в сравнении с аналогом на основе нетканого материала марки АОМ.

Таблица 3.41 - Влияние поверхностной плотности исходных слоев на диссипативные свойства экспериментальных образцов термостойкого вибропоглощающего материала

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

Проведено исследование влияния поверхностной плотности исходных слоев на диссипативные свойства термостойкого вибропоглощающего материала. Полученные результаты (таблица 3.41) показали, что с увеличением поверхностной плотности арамидной ткани и нетканого полотна от 165 до 350 г/м² и от 290 до 420 г/м² соответственно

диссипативные свойства вибропоглощающего материала возрастают почти в 2 раза: КМП от уровня значений 0,09-0,1 до 0,20, динамический модуль упругости - с 60-70 МПа до 150 МПа. Увеличение поверхностной плотности фторопластовой пленки с 220 до 440 г/м² (увеличение толщины от 0,1 до 0,2 мм) приводит к снижению диссипативных свойств вибропоглощающего материала в 2 раза. Можно предположить, что в данном случае полимерный пленочный слой выступает в роли термопластичного связующего, а не является самостоятельным вибропоглощающим слоем, особенно при такой незначительной толщине.

Результаты исследования диссипативных свойств ВПМ в зависимости от частоты приведены в таблице 3.42. Как видно из этих данных, в исследованном диапазоне температур от -60 до 180 °С коэффициент механических потерь достигает максимальных значений в диапазоне температур от -20 до +140 °С независимо от частоты испытаний. Динамический модуль упругости снижается с 184 до 96 МПа с повышением температуры испытаний при частоте 100 Гц, при этом с повышением частоты с 100 до 1000 Гц сначала наблюдается снижение E' до значения 141 МПа при 60 °С, а в дальнейшем рост при возрастании температуры до 180 °С.

Таблица 3.42 - Диссипативные свойства термостойкого вибропоглощающего материала (метод ДМА)

Показатели свойств	Частота, Гц	Температура, °C						
		-60	-20	+20	+60	+100	+140	+180
В условиях сдвигового нагружения								
Коэффициент механических потерь (tgδ)	100	0,10	0,16	0,17	0,16	0,15	0,13	0,10
	1000	0,11	0,17	0,20	0,19	0,17	0,15	0,11
Динамический модуль упругости (E'), МПа	100	318	258	244	106	63	51	40
	1000	184	159	150	141	134	108	96
В условиях трехточечного изгиба								
Коэффициент механических потерь (tgδ)	100	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06
	300	0,12	0,11	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07
Динамический модуль упругости (E')*10 ⁻³ , МПа	100	13,2	11,5	10,3	10,0	9,7	8,5	8,1
	300	15,2	13,2	11,8	11,5	11,2	9,8	9,3

Таким образом, можно предположить, что диссипация вибрационной энергии в данном случае обеспечивается волокнистой структурой слоев материала и происходит за счет трения волокон между собой, а полимерный пленочный слой служит в качестве связующего, обеспечивающего монолитность слоистого материала. Диссипативные свойства слоистого волокнистого ВПМ зависят от состава и массы слоев, но не подчиняются принципу температурно-временной суперпозиции.

Как уже было показано ранее, значения коэффициента механических потерь, полученные при испытании в условиях трехточечного изгиба, ниже в сравнении с $\text{tg}\delta$, определенным в условиях сдвигового нагружения. При этом, отличается и характер зависимости КМП от температуры - с повышением температуры испытаний $\text{tg}\delta$ снижается, а максимальные значения соответствуют области $-60...+20$ °С. Соблюдения принципа температурно-временной суперпозиции, однако, также не наблюдается – с повышением частоты испытаний наблюдается незначительное повышение коэффициента механических потерь и рост динамического модуля упругости. Следует отметить, что за счет использования металлической подложки при испытании в условиях трехточечного изгиба динамический модуль упругости превосходит значения E' , полученные при сдвиговом нагружении на три порядка независимо от частоты испытаний.

3.5.2 Влияние технологических параметров режима прессования на прочность связи между слоями термостойкого вибропоглощающего материала

Экспериментальные образцы ВПМ были изготовлены способом прямого контактного прессования. Качество отпрессованных листов вибропоглощающего материала оценивали по показателю прочности связи между слоями ($\sigma_{\text{рассл.}}$). Исследовано влияние технологических параметров прессования (температура, давление) на данный показатель. Полученные результаты исследований приведены на рисунках 3.9 и 3.10, из которых 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, выпущены ТУ 1-595-9-1074-2009 изм.2 «Материал листовой вибропоглощающий марки ВТП-3В» и ТР 1-595-9-786-2008 изм.2 «Изготовление листового вибропоглощающего материала ВТП-3В».

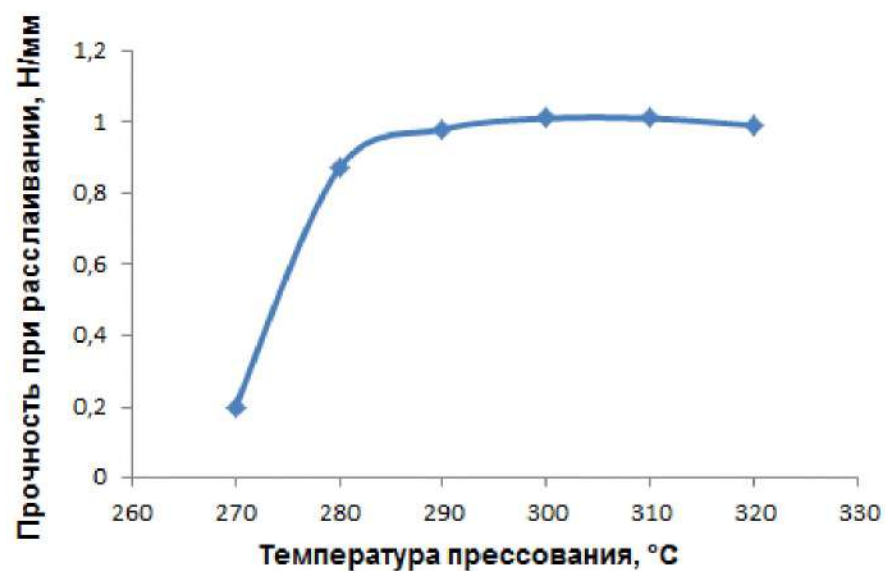


Рисунок 3.9. Влияние температуры прессования на прочность при расслаивании вибропоглощающего материала

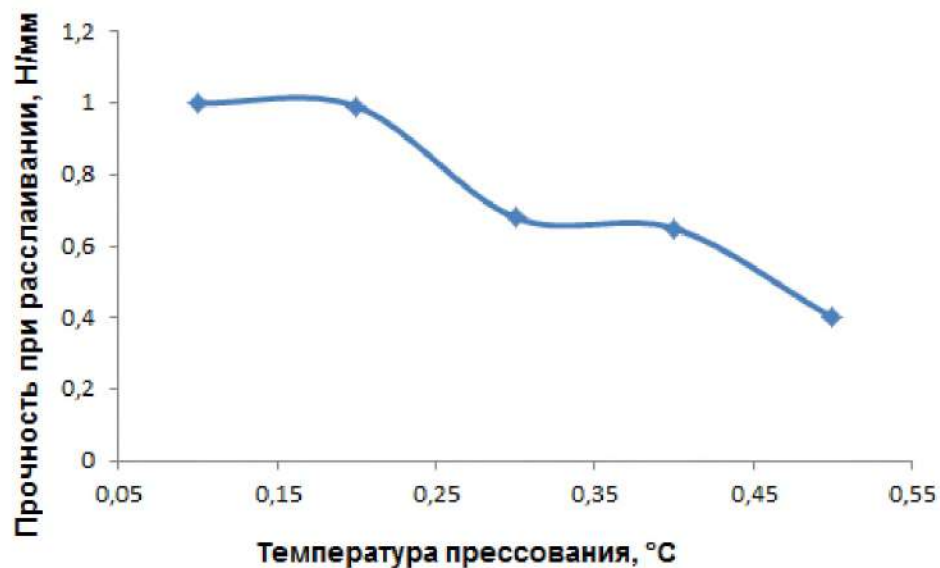


Рисунок 3.10. Влияние давления прессования на прочность при расслаивании вибропоглощающего материала



Рисунок 3.11. Внешний вид листового материала марки ВТП-3В.

Вибропоглощающий материал марки ВТП-3В рекомендуется для применения в качестве покрытия различных конструкций и агрегатов, испытывающих повышенную вибрацию. Материал может эксплуатироваться при температурах от -60 до 180 °С, в том числе при температуре 180 °С в течение 1000 часов.

3.5.3 Влияние типа клея на прочность клеевых соединений слоистого термостойкого вибропоглощающего материала с металлом

Выбор клея холодного отверждения для соединения вибропоглощающего материала ВТП-3В с вибрирующей поверхностью из металла осуществлялся исходя из условий работы вибропоглощающего материала. Для этого максимальная температура эксплуатации клея должна быть не менее 180 °С, температура отверждения – 17-30 °С. Кроме того, клей должен обладать консистенцией, пригодной для нанесения на ворсистую поверхность вибропоглощающего материала, и жизнеспособностью, позволяющей наносить его на большие поверхности. Опробованы два клея холодного отверждения: жесткий эпоксикремнийорганический клей ВК-58 и эластичный кремнийорганический клей ВКР-86. Оба клея отверждаются при комнатной температуре и обладают требуемой консистенцией и жизнеспособностью.

Результаты исследования прочности клеевых соединений вибропоглощающего материала ВТП-3В и подложки из алюминиевого сплава Д16 при отрыве и отслаивании приведены в таблице 3.43. Как видно из приведенных данных, прочность клеевых соединений, изготовленных с использованием клея ВК-58, выше, чем для клея ВКР-86. Он также обладает повышенной жизнеспособностью (5 ч) по сравнению с клеем ВКР-86 (40 мин.), поэтому является предпочтительным. Следует также отметить, что жесткие клеи практически не оказывают влияния на демпфирующие свойства составной конструкции ВПМ с подложкой.

Таблица 3.43 - Результаты определения прочности клеевых соединений вибропоглощающего материала ВТП-3В с подложкой из сплава Д16

Марка клея	Режим отверждения	Прочность при равномерном отрыве, МПа	Прочность при отслаивании, Н/мм
ВК-58	20 °С, 3 суток	0,73	3,5
ВКР-86		0,62	2,7

Из представленных в таблице 3.44 данных следует, что с повышением температуры испытаний прочность при отслаивании клеевых соединений с использованием клея ВК-58

вибропоглощающего материала ВТП-3В с подложкой из сплава Д16АТ снижается по сравнению с исходными значениями, но остается на достаточно высоком уровне.

Таблица 3.44 - Результаты определения прочности клеевых соединений вибропоглощающего материала ВТП-3В с подложкой из сплава Д16 при повышенных температурах

Свойство	Температура испытания, °С			
Прочность при отслаивании, Н/мм	60	100	140	180
	3,65	3,73	2,72	1,48

Довольно высокие показатели прочности при отслаивании имеют клеевые соединения вибропоглощающего материала ВТП-3В с подложкой из сплава Д16АТ после теплового старения на воздухе при 180 °С в течение 200-1000 ч. (таблица 3.45) при проведении испытаний как при нормальной, так и при повышенной температуре, что подтверждает выбор клея марки ВК-58.

Таблица 3.45 - Результаты определения прочности клеевых соединений вибропоглощающего материала ВТП-3В с подложкой из сплава Д16 после теплового старения

Свойство	Температура испытания, °С	Выдержка на воздухе при Т=180 °С в течение, ч		
		200	500	1000
Прочность при отслаивании, Н/мм	20	2,65	1,80	1,43
	180	1,79	0,20	0,26

Прочность на отрыв клеевых соединений вибропоглощающего материала ВТП-3В с использованием клея ВК-58 практически не зависит от типа металла и в исходном состоянии при Т=20 °С $\sigma_{отр.}=0,82$ МПа от подложки из стали 30ХГСА.

Из приведенных выше данных следует, что природа клея влияет на прочность клеевых соединений вибропоглощающего материала ВТП-3В с подложкой из металла. Для соединения указанного ВПМ с подложкой из металла предпочтительно использовать клей марки ВК-58, обладающий необходимым комплексом свойств и обеспечивающий высокий уровень адгезии независимо от типа металла, температуры испытаний и старения.

3.6 ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами

Как правило, в наибольшей степени действию вибрации подвержены жесткие тонкостенные изделия, например, приборная панель, перегородки и прочие слабонагруженные элементы конструкции летательных аппаратов, в том числе выполненные из ПКМ.

Нанесение вибропоглощающего покрытия на поверхности ПКМ позволяет существенно повысить коэффициент механических потерь конструкции, однако это приводит к увеличению ее массы, в особенности в случае использования армированных вибропоглощающих материалов, как показано выше.

Альтернативным решением поставленной задачи является разработка ПКМ с интегрированным в его структуру вибропоглощающим слоем, который под действием изгибающих нагрузок будет испытывать сдвиговые деформации относительно слоев ПКМ и таким образом рассеивать вибрационную энергию. При этом отпадает необходимость использования дополнительного армирующего слоя, так как в качестве него будут выступать слои ПКМ. Таким образом, материал будет относиться к группе АВПМ типа «сэндвич» (и представлять собой аналог алюмотермоэластопласта), армирующие слои которого будут выполнены из ПКМ.

3.6.1 Экспериментальные исследования по разработке ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем

Исходя из предшествующего опыта работы и доступности представленного на рынке сырья, в качестве армирующего наполнителя и полимерного связующего для конструктивных слоев такого ПКМ были выбраны конструкционные стеклоткани Т-10-80, Т-10-14 и эпоксикаучуковая клеевая пленка ВК-51. В качестве вибропоглощающего слоя использовали вибропоглощающий термоэластопласт марки ВТП-1В толщиной 0,5 и 1,0 мм, в том числе не содержащий сажевый наполнитель. Количество слоев ПКМ выбирали исходя из соответствия толщины и поверхностной плотности стандартным ПКМ, т.е. около 4,5-5,0 кг/м², что равняется поверхностной плотности стеклопластиков ВПС-48 и ВПС-47 толщиной 2,5 и 2,7 мм соответственно (см. таблицу 3.46).

При разработке технологических параметров изготовления ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем за единый технологический цикл (одностадийное формование) температурный режим отверждения связующего не должен превышать температуру деструкции вибропоглощающего слоя, которая составляет 250 °С.

Опытные образцы вариантов состава №1-№3 изготовлены при температуре 125 °С и имели незначительные вкрапления, предположительно воздушных пузырьков, поэтому в дальнейшем (варианты состава №4-№11) прессование проводили при 130 °С. Внешний вид изготовленных экспериментальных образцов приведен на рисунке 3.12.

Таблица 3.46 - Состав и схема расположения слоев экспериментальных образцов ПКМ с повышенными вибропоглощающими свойствами

№ вариан та состава	Коли- чество слоев* ПКМ	Состав слоев и структура материала			Толщина образца, мм
		обшивка	внутренний вибропогло- щающий слой**	обшивка	
1	10	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-80	ВТП-1В толщиной 0,5 мм	6 чередующихся слоев клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-80	3,80
2	10	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	ВТП-1В толщиной 0,5 мм	6 чередующихся слоев клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	3,80
3	8	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-80	ВТП-1В толщиной 0,5 мм	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-80	2,98
4	8	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-80	ВТП-1В толщиной 0,5 мм	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-80	2,98
5	8	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	ВТП-1В толщиной 0,5 мм	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	2,80
6	8	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	ВТП-1В толщиной 1,0 мм	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	3,20
7	8	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	ВТП-1В (без добавления наполнителя) толщиной 1,0 мм	4 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	3,10

8	8	2 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14		ВТП-1В толщиной 0,5 мм	6 чередующихся слоев клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14		2,70
9	8	3 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14		ВТП-1В толщиной 0,5 мм	5 чередующихся слоев клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14		2,75
10	8	3 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14		ВТП-1В толщиной 1,0 мм	5 чередующихся слоев клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14		3,05
11	8	3 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	ВТП-1В толщиной 0,5 мм	2 3.чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	ВТП-1В толщиной 0,5 мм	3 чередующихся слоя клеевой пленки ВК-51 и стеклоткани Т-10-14	3,40

**подразумеваются конструкционные слои*

***за исключением варианта состава №11*

Для материалов, сочетающих в составе разнородные по химической природе и структуре слои, прежде всего представляет интерес обеспечение их монолитности (межслойная адгезия) для дальнейшей возможности реализации их функциональных свойств. Были определены следующие характеристики экспериментальных образцов ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем: прочность при изгибе при 20 °С ($\sigma_{изг.}$), коэффициент механических потерь при 20 °С и частоте 100 Гц ($tg\delta$) и поверхностная плотность (Р) - масса 1 м². Результаты исследований приведены в таблицах 3.47 и 3.48.

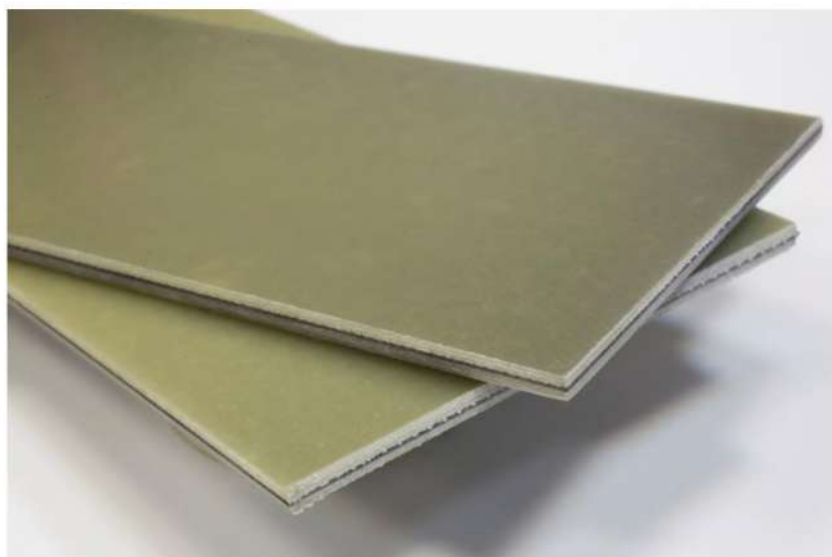


Рисунок 3.12. Экспериментальные образцы ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем.

Таблица 3.47 - Результаты определения прочности связи между вибропоглощающими и армирующими слоями (межслойной адгезии) экспериментальных образцов ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем

Состав вибропоглощающих и армирующих слоев		Прочность связи между слоями, Н/мм
ВТП-1В толщиной 0,5 мм	клеевая пленка ВК-51 и стеклоткань Т-10-80	6,4
	клеевая пленка ВК-51 и стеклоткань Т-10-14	6,2
ВТП-1В толщиной 1,0 мм	клеевая пленка ВК-51 и стеклоткань Т-10-80	8,9
	клеевая пленка ВК-51 и стеклоткань Т-10-14	9,1

Согласно приведенным в таблице 3.47 данным, все испытанные образцы ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем имеют высокие значения межслойной адгезии ($\sigma_{отсл.} > 6,0$ Н/мм) независимо от вида используемого замасливателя стеклоткани. При этом, как уже было показано ранее, с увеличением толщины вибропоглощающего слоя прочность связи между слоями возрастает, а наличие сажевого наполнителя в составе вибропоглощающего слоя практически не влияет на ее величину.

Необходимо отметить, что по данному показателю экспериментальные образцы ПКМ соответствуют АВПМ с металлическим армирующим слоем, например, экспериментальным образцам вибропоглощающего алюмотермоэластопласта, изготовленным по оптимальному режиму прессования, или АВПМ классического состава после активации поверхности вибропоглощающего слоя. Однако они значительно уступают ВПМ с композиционными армирующими слоями на основе связующего ВК-51, имеющих $\sigma_{отсл.} = 15,5$ и $30,2$ Н/мм в зависимости от армирующего наполнителя.

Таблица 3.48 - Результаты определения физических, механических и вибропоглощающих свойств экспериментальных образцов ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем

№ варианта состава	Коэффициент механических потерь при 20 °С и частоте 100 Гц	Прочность при изгибе при 20 °С, 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

Очевидно, что поверхностная плотность экспериментальных образцов ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем определяется массой 1 м² армирующего наполнителя, связующего и вибропоглощающего слоя (при соблюдении технологических режимов и отсутствии значительных выпрессовок) и возрастает с увеличением количества 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. Несмотря на наличие дополнительного внутреннего вибропоглощающего слоя экспериментальные образцы ПКМ по массовой характеристике соответствуют стандартным ПКМ эквивалентных толщин.

Основным показателем качества образцов ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем, является коэффициент механических потерь.

Из представленных в таблице 3.48 данных видно, что четкой зависимости 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 $\text{tg}\delta=0,050\div0,079$. Следовательно, как уже было установлено ранее, на демпфирующие свойства образцов оказывает влияние конфигурация расположения слоев или структура ПКМ. При этом следует отметить, что вид замасливателя стеклоткани практически не оказывает влияния на величину коэффициента механических потерь.

Симметричные восьмислойные образцы (варианты №3 и №4) имеют одинаковый состав, но изготовлены при различных температурах прессования, при этом они 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 опытных образцов ПКМ, но и на их демпфирующих свойствах. Таким образом прослеживается зависимость функциональных свойств от технологических параметров изготовления материала. Вероятно, это может быть связано со степенью отверждения полимерного связующего, хотя в то же время не находит отражения на межслойной адгезии.

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. Из этого следует, что увеличение толщины внутреннего вибропоглощающего слоя приводит к ухудшению демпфирующих свойств образцов ПКМ. При этом образцы с вибропоглощающим слоем, содержащим сажевый наполнитель (№6), уступают аналогичным, не содержащим его (№7). Таким образом, целесообразно рассмотреть влияние наполнителя на вибропоглощающие свойства ВПМ.

Из представленных данных также следует, что образцы ПКМ, имеющие симметричное расположение слоев относительно центрального вибропоглощающего слоя, по величине коэффициента механических потерь превосходят несимметричные образцы, и эта зависимость сохраняется при использовании слоя ВТП-1В различных толщин (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. Возможно, 2 чередующихся слоя клеевой пленки и стеклоткани, т.е. 2 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 ВТП-1В толщиной 0,5 мм и имеющие $\text{tg}\delta=0,050$ и 0,051 соответственно, так и образцы №6 и №8 с ВТП-1В 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 еще раз

подтверждает влияние конфигурации расположения слоев ПКМ. Можно предположить, что в этом случае наблюдается эффект демпфирования при помощи двух слоев вибропоглощающего материала, т.е. коэффициент механических потерь складывается из $\operatorname{tg} \delta$ двух слоев материала ВТП-1В, 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 значительное снижение их механических свойств. Исследована прочность при изгибе ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем (таблица 3.53).

Из представленных в таблице 3.48 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).

Влияние на прочность связи между слоями оказывает вид замасливателя стеклоткани (14-ому соответствуют большие значения) и толщина внутреннего вибропоглощающего слоя. 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.

Следует отметить, что в данном случае температурный режим прессования не оказал значительного влияния на прочность при изгибе (что следует из сравнения свойств 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 образцов ПКМ.

3.6.2 Разработка ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем

С учетом описанных выше результатов исследования и опыта разработки армированного вибропоглощающего материала марки ВТП-1В-А (АВПМ с композиционным армирующим слоем) были выбраны состав и структура ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем. Для опробования в качестве наполнителя армирующих слоев ПКМ были выбраны стеклоткани

следующих марок: Т-10-14, Т-15-П76, Т-64 (ВМП), Т-60 (ВМП), основные свойства которых приведены в таблице 2.1.2 раздела «Объекты исследования».

За базовый вариант была принята стеклоткань Т-10-14 (выше было показано, что вид замасливателя не оказывает существенного влияния на демпфирующие свойства конечного материала), стеклоткани марок Т-15 (П)-76 и Т-64 (ВМП)-78 выбраны благодаря низкой поверхностной плотности, а марки Т-60/2 (ВМП)-14 – высоким прочностным характеристикам.

Для использования в качестве матрицы ПКМ были выбраны клеевое связующее марки ВСК-14-6 и эпоксидный пленочный клей ВК-51, в качестве внутреннего вибропоглощающего слоя - пленки на основе термопластичного полиуретана марки Витур Т0533-90С (толщиной 0,5 мм) и модифицированного поливинилацетата марки ВПС-2,5 (по имеющемуся опыту работы с вибропоглощающими материалами марок ВТП-1В и ВТП-2В).

Выбор связующего ВСК-14-6 и клеевой пленки ВК-51 обусловлен возможностью их одновременной переработки (температура отверждения 130÷140 °С, удельное давление 2 атм. в течение 3 ч.) с вибропоглощающими слоями на основе термопластов марок Витур Т 0533-90С и ВПС-2,5, имеющих температуру деструкции 245-250 °С и 155-160 °С соответственно, кроме того связующее ВСК-14-6 характеризуется пониженной горючестью.



Рисунок 3.13. Структурная схема образца разрабатываемого материала.

В результате ранее проведенных работ было установлено, что на величину коэффициента механических потерь ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем оказывает влияние конфигурация расположения армирующих слоев ПКМ, причем симметричное их размещение относительно центрального вибропоглощающего эффективнее, а увеличение толщины вибропоглощающего слоя и количества вибропоглощающих слоев негативно

сказываются на прочностных характеристиках ПКМ, поэтому используются минимально возможные толщины вибропоглощающих слоев.

Количество конструкционных слоев каждого варианта экспериментальных образцов ПКМ определялось, исходя из массы 1 м^2 компонентов, поверхностной плотности результирующего материала (которая, как уже было показано выше, для обеспечения массовой эффективности не должна превышать 5 кг/м^2) и обеспечения прочностных характеристик композита.

Прессовым способом были изготовлены экспериментальные образцы ПКМ различных вариантов, составы которых приведены в таблице 3.49.

Для получения экспериментальных образцов также были опробованы стандартные способы изготовления ПКМ - автоклавное и вакуумное формование.

Как было показано выше, технологические параметры прессования определяются режимом отверждения связующих и составляют: температура прессования 130 и 140 °С, удельное давление 0,2 и 0,5 МПа для ПКМ на основе ВК-51 и ВСК-14-6 соответственно, время выдержки под давлением для двух видов матриц составляет 3 ч. Охлаждение отпрессованных образцов проводилось в прессе под давлением до комнатной температуры.

Таблица 3.49 – Состав экспериментальных образцов ПКМ

№ варианта состава	Состав конструкционных слоев связующее /наполнитель	Внутренний вибропоглощающий слой	Количество слоев	Толщина образца, мм
1	ВК-51/Т-10	Пленка Витур Т0533-90С	8	2,76
2	ВК-51/Т-60		10	2,77
3	ВК-51/Т-10	Пленка ВПС-2,5	10	3,00
4	ВК-51/Т-60		16	2,30
5	ВСК 14-6/Т-10	Пленка Витур Т0533-90С	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 ВПС-2,5	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

Исследовано влияние различных способов изготовления на основные свойства ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем. Результаты испытаний приведены в таблице 3.50.

Экспериментальные образцы ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем из термопластичного полиуретана марки Витур Т0533-90С были изготовлены тремя способами: прессованием на гидравлическом прессе; автоклавным формованием собранного пакета

слоистого ПКМ; вакуумным формованием с предварительной сборкой пакета для прессования в оснастке.

Таким образом образцы ПКМ, изготовленные прессованием и автоклавным формованием, по прочности при изгибе находятся примерно на одном уровне, поэтому оба способа могут быть рекомендованы для получения ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем. При этом наиболее высокие значения прочности при изгибе имеют образцы материала, изготовленные способом прессования. Им значительно уступают по данному показателю образцы ПКМ, изготовленные вакуумным формованием, - они имеют прочность при изгибе в 1,6-1,8 раз ниже. Следовательно, данный способ не подходит для изготовления подобного рода материалов, очевидно, из-за невысокого давления, не достаточного для обеспечения соединения конструкционных и вибропоглощающего слоев между собой и получения монолитного материала.

Таблица 3.50 – Коэффициент механических потерь и прочность при изгибе 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	<u>406</u> 400-410
Прессование	0,05	0,06	0,13	0,14	0,10	0,10	<u>480</u> 465-485
Вакуумное формование	0,06	0,06	0,16	0,13	0,08	0,06	<u>260</u> 250-270

Из представленных в таблице 3.50 данных 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, различные способы изготовления ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем в основном оказывают влияние на механические свойства слоистого материала.

Результаты исследования основных свойств (поверхностная плотность, влагопоглощение за 24 ч, межслойная адгезия при 20 °С, коэффициент механических потерь при частоте 100 Гц в диапазоне температур от -60 до +80 °С, прочность при изгибе при 20 °С, горючесть) изготовленных экспериментальных образцов приведены в таблицах 3.51-3.53 и на рисунках 3.14 и 3.15.

Из представленных в таблицах 3.51-3.53 данных следует, что все экспериментальные образцы ПКМ на основе конструкционных слоев со связующим из клеевой пленки ВК-51 и

высокопрочных стеклянных наполнителей (вариантов состава №№ 1-4) по величине поверхностной плотности не превосходят 5 кг/м^2 , в то время как ряд исследованных образцов на основе конструкционных слоев со связующим ВСК-14-6 (варианты состава №№ 5, 9 и 10) не соответствуют данным требованиям.

Таблица 3.51 - Результаты исследования основных свойств образцов ПКМ на основе конструкционных слоев со связующим из клеевой пленки ВК-51 и высокопрочных стеклянных наполнителей

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 Витур Т0533-90С		Внутренний вибропоглощающий слой ВПС-2,5	
	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			

Таблица 3.52 - Результаты исследования основных свойств образцов ПКМ на основе конструкционных слоев со связующим ВСК-14-6 и внутренним вибропоглощающим слоем из Витур Т0533-90С

Свойство	Армирующий наполнитель конструкционных слоев			
	Т-10	Т-60	Т-64	Т-15
	вариант 5	вариант 6	вариант 7	вариант 8
Поверхностная плотность, кг/м^2	5,900	5,000	4,350	4,300
Влагопоглощение за 24 ч., %	0,08	0,10	0,10	0,08
Прочность при изгибе, МПа	220	470	350	250
Прочность связи между слоями*, Н/мм	5,8	7,1	7,2	4,6
Горючесть (в течение 60 с)	самозатухающий		сгорающий	

*разрушение происходит по когезионному механизму

Таблица 3.53 - Результаты исследования основных свойств образцов ПКМ на основе конструкционных слоев со связующим ВСК-14-6 и внутренним вибропоглощающим слоем из ВПС-2,5

Свойство	Армирующий наполнитель конструкционных слоев			
	Т-10	Т-60	Т-64	Т-15
	вариант 9	вариант 10	вариант 11	вариант 12
Поверхностная ² плотность, г/м	6,400	5,500	4,200	4,550
Влагопоглощение за 24 ч., %	0,13	0,12	0,19	0,21
Прочность при изгибе, МПа	150	255	120	110
Прочность связи между слоями, Н/мм	0,1	11,1	8,3	5,7
Горючесть (в течение 60 с)	трудногорючий			

Из сравнения показателей влагопоглощения образцов вариантов состава №№ 1, 2 и 5, 6, №№ 3, 4 и 9, 10 следует, что экспериментальные образцы ПКМ на основе конструкционных слоев со связующим из клеевой пленки ВК-51 поглощают большее количество влаги за 24 ч., чем аналоги на основе связующего ВСК-14-6 как при использовании Витур Т0533-90С, так и ВПС-2,5 в качестве внутренних вибропоглощающих слоев.

Следует отметить, что образцы вариантов состава №№ 1-4 характеризуются примерно одинаковым влагопоглощением независимо от природы внутренних вибропоглощающих слоев и армирующих наполнителей конструкционных слоев. В отличие от них, влагопоглощение образцов на основе связующего ВСК-14-6 (варианты №№ 5-8 и 9-12) в большей степени зависит от состава внутреннего вибропоглощающего слоя: образцы с интегрированным вибропоглощающим слоем из пленки ВПС-2,5 превосходят аналоги с внутренним слоем из Витур Т0533-90С в 1,2-2,6 раза, причем в случае использования последнего значительного влияния армирующего наполнителя на данный показатель не наблюдается (более того, он соответствует уровню свойств ПКМ, не имеющих в своем составе внутренних вибропоглощающих слоев), а для поливинилацетатной пленки наибольшие значения соответствуют стеклотканям Т-64 и Т-15, обладающим наименьшей массой.

Перед началом исследований механических характеристик экспериментальных образцов ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем был проведен их неразрушающий контроль с целью исключения влияния дефектных зон на определяемые показатели. При сканировании образцов не было зафиксировано падения амплитуды прошедшего сигнала ниже уровня строга по всей площади образцов, что свидетельствует об отсутствии дефектов в них.

Прочность при изгибе образцов ПКМ на основе стеклоткани Т-10 и Т-60, не содержащих внутренний вибропоглощающий слой, составляет 570 и 630 МПа соответственно. Как и

следовало ожидать, внедрение вибропоглощающего слоя во внутреннюю структуру слоистого пластика приводит к снижению его механических характеристик (в 2,5-4 раза) по причине уменьшения степени наполнения ПКМ, а также низких механических свойств внедряемых вибропоглощающих слоев, что согласуется с имеющимися литературными данными. При этом из результатов исследований прочности при изгибе следует, что не только изменение структуры ПКМ, но и состав внутреннего вибропоглощающего слоя оказывает значительное влияние на механические свойства всех исследованных экспериментальных образцов.

Образцы, содержащие интегрированную пленку на основе модифицированного поливинилацетата, по величине прочности при изгибе уступают аналогам с термопластичным полиуретаном почти в 2-3 раза в зависимости от марки используемой стеклоткани, но независимо от вида используемого связующего (следует из сравнения показателей образцов вариантов состава №№ 1 и 3, 2 и 4, 5 и 9, 6 и 10, 7 и 11, 8 и 12).

Наибольшие показатели $\sigma_{изг.}=470$ и 440 МПа имели образцы с внутренним вибропоглощающим слоем из материала Витур Т0533-90С и наполнителя конструкционных слоев из стеклоткани Т-60 на основе связующего ВСК-14-6 и клея ВК-51 соответственно (варианты №6 и №2), наименьшие – на основе связующего ВСК-14-6 и стеклоткани Т-15 с интегрируемым слоем ВПС-2,5 (варианты состава №11 и №12). Интересная зависимость наблюдается в случае сравнения прочности при изгибе образцов вариантов состава №№ 1 и 5, 3 и 9, 2 и 6, 4 и 10: образцы, содержащие конструкционные слои на основе стеклоткани Т-10 и клея ВК-51, превосходят аналоги на основе связующего ВСК-14-6 независимо от вида используемого вибропоглощающего слоя, а образцы, имеющие в составе стеклоткань Т-60, характеризуются обратной зависимостью, в связи с чем данная стеклоткань является более предпочтительной для применения в качестве армирующего наполнителя конструкционных слоев ПКМ для достижения высоких показателей механических свойств.

Из сопоставления полученных данных с результатами исследования межслойной адгезии экспериментальных образцов вариантов состава №№ 1-4 следует, что прочность связи между вибропоглощающим и конструктивными слоями при 20 °С практически не зависит от вида армирующего наполнителя и в незначительной степени определяется составом внутреннего вибропоглощающего слоя, при этом образцам с максимальными показателями $\sigma_{изг.}$ (варианты 1 и 2) соответствуют наибольшие значения межслойной адгезии.

Для образцов ПКМ, полученных с использованием связующего ВСК-14-6, не удается установить четкую корреляционную зависимость между межслойной адгезией и их составом (в особенности учитывая когезионный характер разрушения ряда образцов), однако стоит отметить, что образцы, имеющие максимальное значение прочности при расслаивании, также

характеризуются наибольшими показателями прочности при изгибе (470 и 350 МПа для образцов с внутренним слоем на основе Витур Т0533-90С и 255 МПа – на основе ВПС-2,5).

Из таблиц 3.51-3.53 также следует, что горючесть экспериментальных образцов определяется составом исходных компонентов: варианты состава №№ 1-4, 7, 8 относятся к категории сгорающих, в то время как образцы ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем Витур Т0533-90С и конструктивными слоями на основе связующего ВСК-14-6 и армирующими наполнителями из стеклотканей Т-10 и Т-60 являются самозатухающими (варианты 5 и 6), а все образцы с интегрированным вибропоглощающим слоем из поливинилацетатной пленки ВПС-2,5 (вариантов №№ 9-12) являются трудносгорающими и превосходят аналоги с внутренним слоем из Витура.

Частотная зависимость КМП экспериментальных образцов вариантов состава №№ 5-12 приведена в таблице 3.54, откуда также следует, что наиболее высокие значения демпфирующих свойств имеют образцы с внутренним слоем из поливинилацетатной пленки ВПС-2,5. Кроме того эти образцы подчиняются принципу температурно-временной суперпозиции, т.е. их КМП понижается с увеличением частоты, а частотная зависимость $\text{tg}\delta$ экспериментальных образцов ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем из пленки Витур Т0533-90С проходит через пик в области 300 Гц.

Таблица 3.54 - Коэффициент механических потерь образцов ПКМ на основе конструктивных слоев со связующим ВСК-14-6 и интегрированным вибропоглощающим слоем из термопластичного полиуретана и поливинилацетата при температуре 20 °С и различных частотах

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							
	Витур Т0533- 90С	ВПС- 2,5	Витур Т0533- 90С	ВПС- 2,5	Витур Т0533- 90С	ВПС- 2,5	Витур Т0533- 90С	ВПС-2,5
	№5	№9	№6	№10	№7	№11	№8	№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

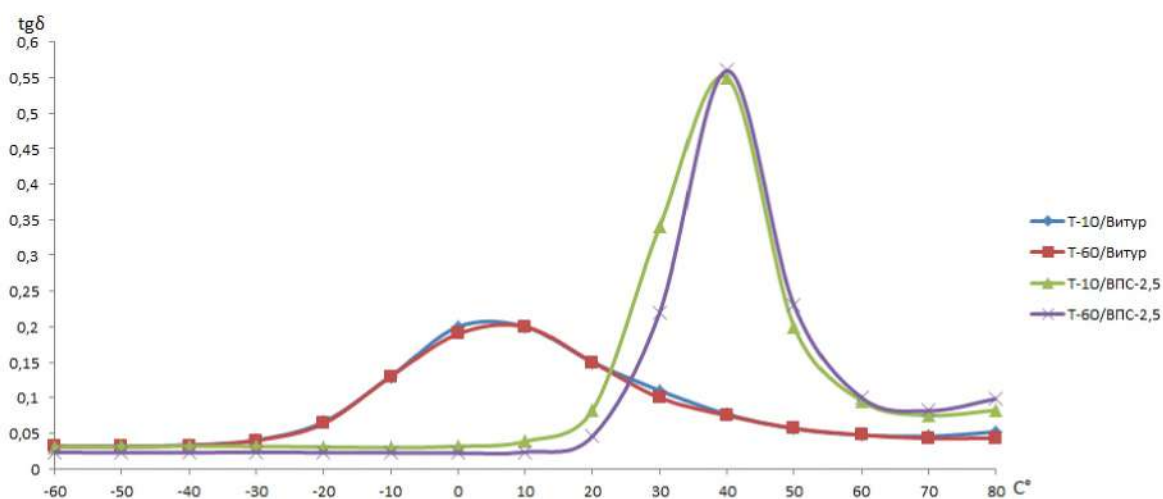
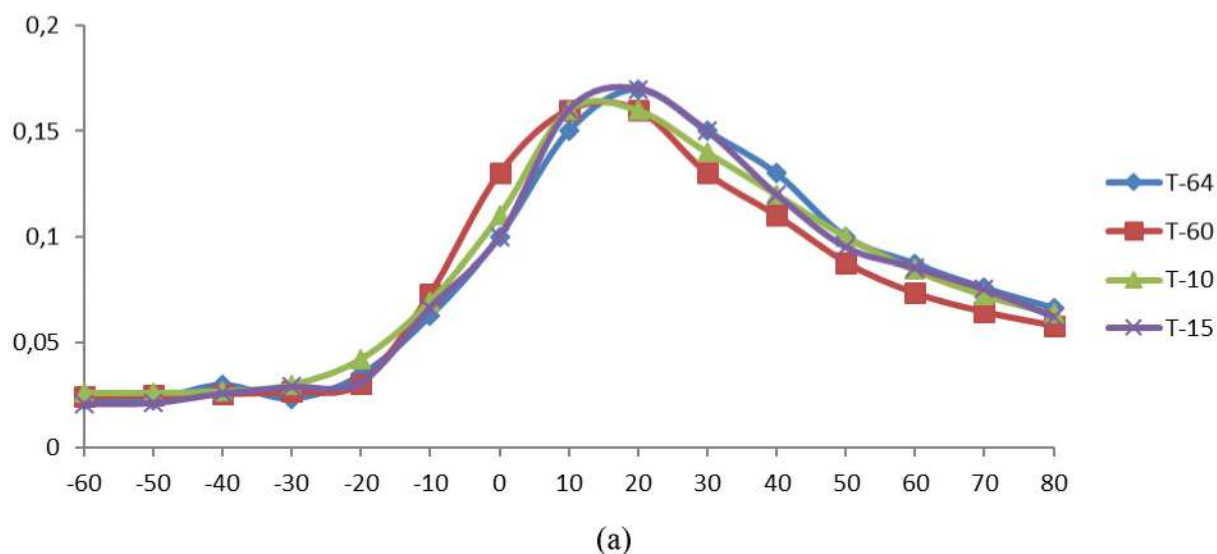
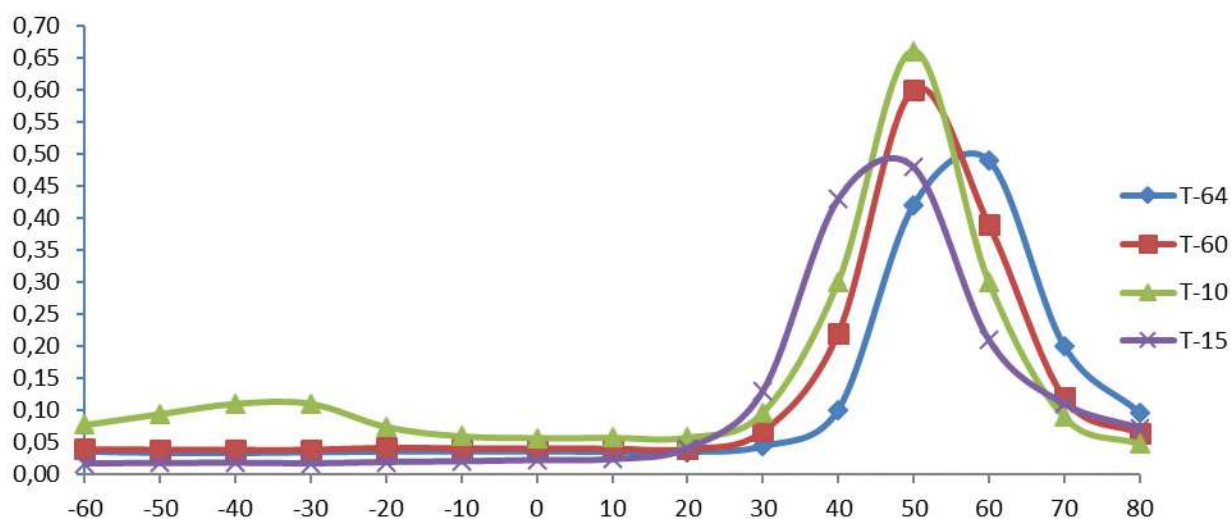


Рисунок 3.14. Температурная зависимость КМП образцов ПКМ на основе конструкционных слоев из стеклотканей Т-10 и Т-60 и связующего из клеевой пленки ВК-51 с интегрированным вибропоглощающим слоем на основе термопластичного полиуретана и поливинилацетатной пленки при частоте 100 Гц.

Как видно из представленных на рисунках 3.14 и 3.15 температурных зависимостей коэффициента механических потерь образцов ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем различных вариантов состава, максимум вибропоглощения определяется природой внедренного слоя, а именно, его температурой стеклования, что характерно для всех вибродемпфирующих материалов. Для образцов с внутренним вибропоглощающим слоем из термопластичного полиуретана он находится в области $-10...+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, а со слоем из поливинилацетатной пленки - соответствует диапазону $+35...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. При этом вид связующего и структура армирующего наполнителя конструкционных слоев не оказывают значительного влияния на вибропоглощающие свойства материала в целом.





(б)

Рисунок 3.15. Температурная зависимость КМП образцов ПКМ на основе связующего ВСК-14-6 с интегрированным вибропоглощающим слоем на основе термопластичного полиуретана (а) и поливинилацетатной пленки (б) при частоте 100 Гц.

Образцы ПКМ с внутренним вибропоглощающим слоем из поливинилацетатной пленки по демпфирующим свойствам и, в особенности, по значению экстремума $\text{tg}\delta_{\text{max}}$ значительно превосходят аналогичные образцы с термопластичным полиуретаном.

Таким образом, экспериментальным путем показано, что внедрение вибропоглощающего слоя во внутреннюю структуру слоистого пластика приводит к значительному повышению его вибропоглощающих свойств, но при этом снижает механические характеристики конструкции.

В результате выполненных работ разработаны состав и технология изготовления ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВТП-1ВД, на которую выпущена технологическая рекомендация ТР 1.2.2664-2018 «Изготовление ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВПС-68/В». В связи с корректировкой марки ВПС-68/В выпущено изменение № 1 к ТР 1.2.2664-2018 «Изготовление ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВПС-68/В».

Получен патент на изобретение РФ № 2687938 от 16.05.2019 «Полимерный композиционный материал с интегрированным вибропоглощающим слоем».

Материал марки ВТП-1ВД рекомендуется для применения в слабонагруженных элементах конструкции воздушных судов, в том числе изделий вертолетной техники, работоспособных в диапазоне температур от минус 60 до плюс 80 °C. Внешний вид элемента конструкции, выполненного из материала марки ВТП-1ВД, приведен на рисунке 3.16.



Рисунок 3.16. Элемент конструкции, изготовленный из ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем.

3.6.3 Исследование причин снижения прочностных характеристик ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем

Многими исследователями подтверждаются закономерности снижения прочностных свойств слоистых пластиков, аналогичные показанным в разделе 3.6.2, с одновременным снижением жесткости и температуры стеклования композитов в результате внедрения вибропоглощающего слоя в их структуру.

Предположительно, наряду с уменьшением степени наполнения ПКМ и физико-механическими характеристиками внедряемого вибропоглощающего слоя, на снижение прочностных показателей будет влиять механизм взаимодействия эпоксидного связующего и вибропоглощающего слоя. Вероятно, 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.

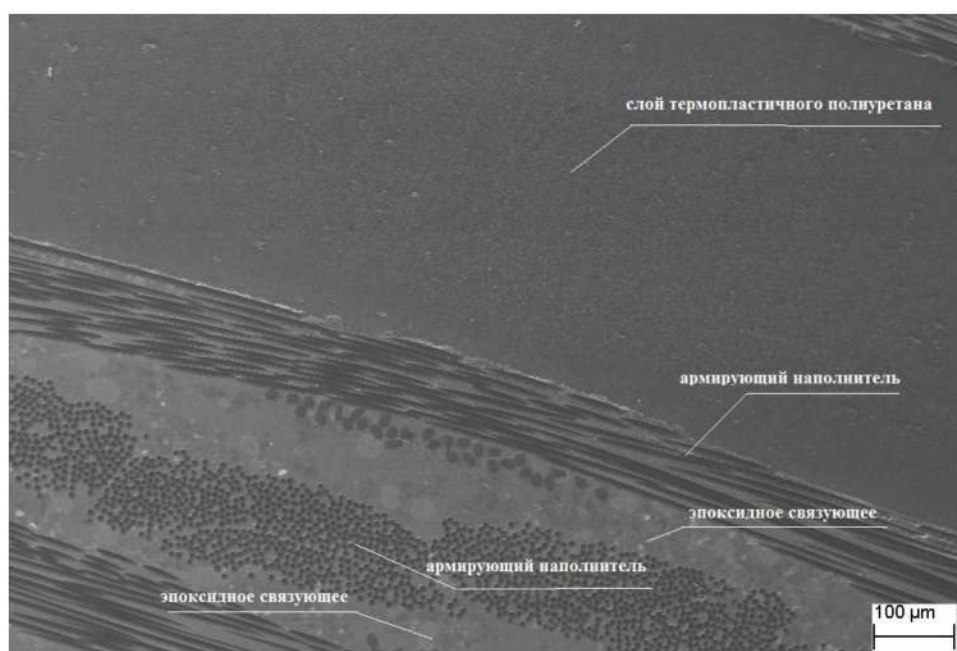
Учитывая результаты определения прочности при изгибе, и тот факт, что структура армирующего наполнителя конструкционных слоев практически не оказывает значительного влияния на вибропоглощающие свойства слоистого пластика с внутренним вибропоглощающим слоем, были проведены дополнительные исследования образцов на основе стеклоткани Т-60. Наибольший интерес представляли образцы ПКМ с внутренним

вибропоглощающим слоем на основе поливинилацетата, имеющие высокие значения коэффициента механических потерь и низкие показатели механических свойств.

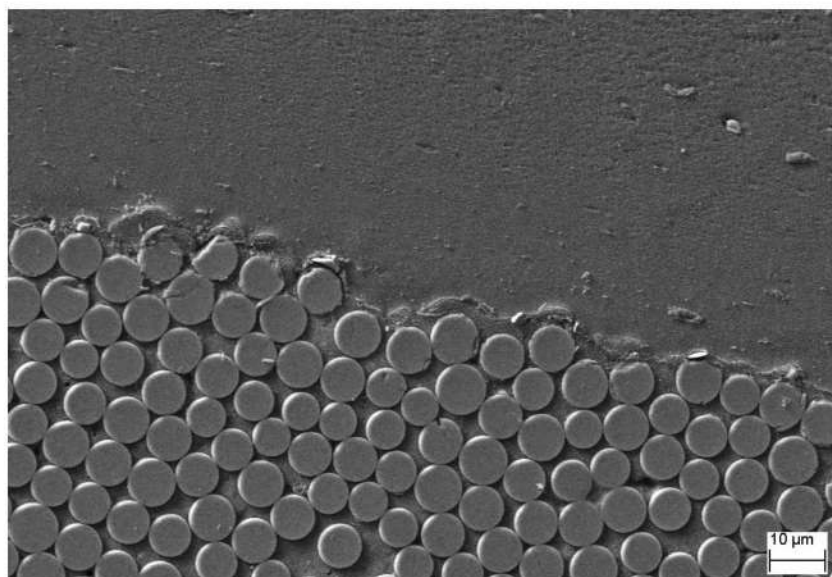
Для объяснения механизма взаимодействия компонентов слоистого материала исследована микроструктура композита на границе раздела фаз вибропоглощающего и конструкционных слоев (рисунок 3.17).

На изображениях 3.17 (а) и (б) видна четкая граница между фазами конструкционных слоев и термопластичного полиуретана, в то время как на изображениях 3.19 (в) и (г) прослеживается миграция материала вибропоглощающего слоя в структуру конструкционных слоев. В случае использования вибропоглощающего слоя из поливинилацетата на границе раздела фаз наблюдаются образования по типу «кратеров» и прочие продукты взаимодействия. То есть представленные микрофотографии подтверждают предположения об активных диффузионном и реакционном взаимодействиях между материалами связующего и вибропоглощающего слоя на основе поливинилацетата. В то же время граница раздела фаз полиуретанового и эпоксидного слоя схожа с клеевым соединением - реализуется адгезионное взаимодействие.

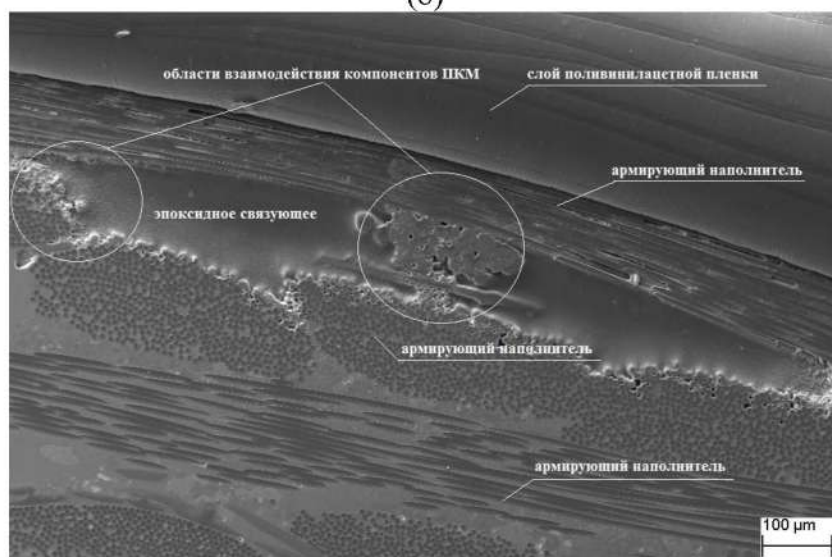
Однако, следует отметить, что лучшим комплексом свойств из исследованных обладают образцы материала марки ВТП-1ВД, включающие конструкционные слои на основе препрега из стеклоткани Т-60 и связующего ВСК-14-6 с внутренним вибропоглощающим слоем из термопластичного полиуретана марки Витур Т0533-90С.



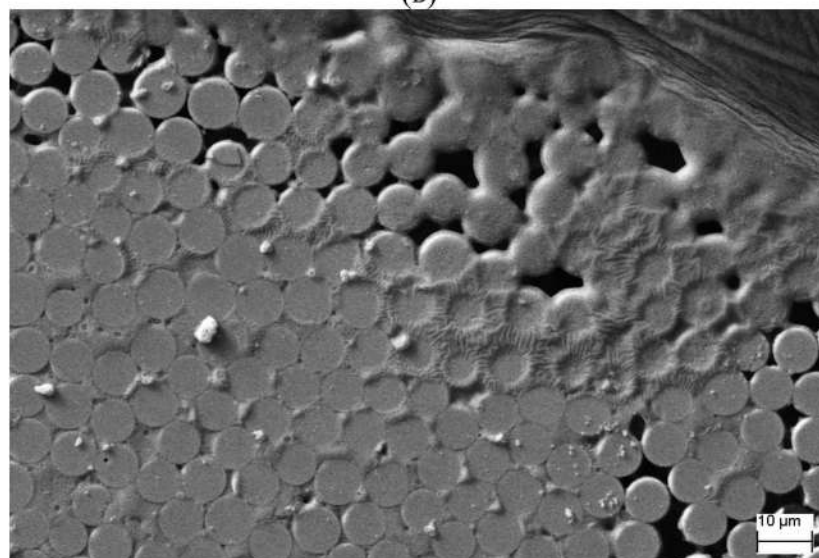
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 3.17. Микрофотографии срезов образцов слоистых пластиков с внутренними вибропоглощающими слоями на основе термопластичного полиуретана (а, б) и поливинилацетата (в, г)

3.6.4 Трехслойная сотовая конструкция с внутренним вибропоглощающим слоем

Рассмотрено влияние вибропоглощающей прослойки, интегрированной в структуру трехслойной сотовой конструкции, на ее функциональные свойства. Состав и структура трехслойной сотовой панели приведены в разделе 2.1 главы 2 «Объекты исследования».

Определены следующие свойства изготовленных экспериментальных образцов композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем: поверхностная плотность (P), звукоизоляция, звукопоглощение, теплопроводность и коэффициент механических потерь вибропоглощающего слоя и обшивок. Результаты исследований приведены в таблицах 3.55-3.59.

По результатам исследования влияния состава композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели на ее поверхностную плотность установлено, что наибольшее значение массы 1 м^2 имеют экспериментальные образцы сэндвич-панели, включающие в состав одну из обшивок с интегрированным вибропоглощающим слоем (вариант состава (б)). Это объясняется использованием дополнительного монослоя препрега в составе упомянутой обшивки для предотвращения снижения ее прочностных свойств из-за наличия вибропоглощающей прослойки.

Внедрение вибропоглощающего слоя в классическую сэндвич-панель варианта (а) привело к повышению массы экспериментальных образцов вариантов состава (б) и (в) в среднем на 17 и 10 % соответственно (таблица 3.55).

Таблица 3.55 - Поверхностная плотность экспериментальных образцов композитных звуко-теплоизолирующих сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем

Состав образца	Поверхностная плотность, г/м^2
Обшивка/стеклосотопласт/обшивка (вариант (а))	3750
Обшивка/стеклосотопласт/обшивка с внутренним вибропоглощающим слоем (вариант (б))	4400
Обшивка/стеклосотопласт/вибропоглощающий слой/обшивка (вариант (в))	4140

Влияние состава композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели на ее акустические свойства показано в таблице 3.56.

Таблица 3.56 - Звукоизоляция экспериментальных образцов композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем в диапазоне частот 50-1600 Гц

Частота, Гц	Состав экспериментальных образцов				
	обшивка стеклосото- пласт обшивка (вариант (а))	обшивка стеклосотопласт вибропоглощающий слой (ВП) обшивка (вариант (в))		обшивка стеклосотопласт обшивка с внутренним вибропоглощающим (ВП) слоем (вариант (б))	
		Расположение образца к источнику звука			
		К звуку обшивка	К звуку обшивка с ВП слоем	К звуку обшивка	К звуку обшивка с ВП слоем
50	55,38	52,03	45,50	55,06	51,28
63	56,79	56,95	46,44	46,83	53,09
80	57,68	56,77	43,32	47,25	51,65
100	51,72	50,05	42,29	44,78	54,20
125	53,33	50,19	43,73	45,64	56,29
160	53,46	53,31	44,26	47,13	55,69
200	60,74	53,55	45,72	49,84	58,51
250	56,27	53,26	46,08	50,46	59,72
315	60,03	56,96	46,39	53,03	61,82
400	55,27	67,42	48,62	53,51	58,40
500	51,36	63,35	48,66	59,53	60,54
630	56,32	58,85	49,87	62,43	62,42
800	56,05	61,40	51,56	64,43	62,18
1000	54,95	60,49	48,38	63,78	65,47
1250	55,33	56,48	47,61	59,43	58,52
1600	54,95	56,00	46,49	59,35	58,51

Звукоизоляция экспериментальных образцов сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем в диапазоне частот 500-1600 Гц начинает возрастать в области средних частот (200-400 Гц) и в дальнейшем увеличивается при повышении частоты испытаний, причем эта зависимость сохраняется независимо от ориентации образцов к источнику звука. Частотная зависимость звукоизоляции экспериментального образца классической трехслойной сэндвич-панели, не содержащей интегрированный

вибропоглощающий слой, находится примерно на уровне 55-56 дБ во всем исследованном диапазоне частот.

В области низких частот наибольшие значения звукоизоляции имеют экспериментальные образцы сэндвич-панели с вибропоглощающим слоем, интегрированным в структуру одной из обшивок, расположенной этой стороной к источнику звука, за исключением небольшого участка. Наименьшую звукоизоляцию имеют образцы состава (в), обращенные к источнику звука стороной с вибропоглощающим слоем, и образцы сэндвич-панели, не содержащей вибропоглощающий слой. Промежуточное положение занимают образцы сэндвич-панели с вибропоглощающим слоем, расположенным между стеклосотопластом и одной из обшивок, обращенные к источнику звука противоположной от вибропоглощающей прослойки стороной.

Таблица 3.57 - Звукоизоляция экспериментальных образцов композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем в диапазоне частот 500-6300 Гц

Частота, Гц	Состав экспериментальных образцов				
	обшивка стеклосотоплас т обшивка (вариант (а))	обшивка стеклосотопласт вибропоглощающий слой (ВП) обшивка (вариант (в))		обшивка стеклосотопласт обшивка с внутренним вибропоглощающим (ВП) слоем (вариант (б))	
		Расположение образца к источнику звука			
		К звуку обшивка	К звуку обшивка с ВП слоем	К звуку обшивка	К звуку обшивка с ВП слоем
500	52,86	63,84	49,06	59,13	60,14
630	55,93	58,37	50,17	62,03	62,82
800	56,56	61,99	51,26	64,83	62,68
1000	55,41	60,89	48,78	63,38	65,07
1250	55,88	56,98	47,11	59,73	58,92
1600	55,46	56,40	46,89	59,85	58,01
2000	65,20	62,88	51,95	64,30	65,36
2500	63,46	62,28	53,65	65,95	65,42
3150	61,41	59,75	55,37	64,36	62,81
4000	59,07	56,72	54,61	61,78	61,58
5000	54,48	52,52	51,73	59,18	58,54
6300	50,72	48,18	47,51	55,88	55,80

Можно предположить, что вибропоглощающий слой, не интегрированный в структуру обшивки, незначительно снижает звукоизоляцию сэндвич-панели, что должно учитываться при ориентировании ее относительно источника звука.

Как видно из представленных в таблице 3.57 данных, при повышении частоты испытаний звукоизоляция всех исследованных экспериментальных образцов композитных звукотеплоизолирующих сэндвич-панелей имеет более высокие показатели по сравнению с областями низких и средних частот. При этом все частотные зависимости также имеют аналогичный характер – минимум в области частот около 1600 Гц и пик в области 2000-3000 Гц. Как и в предыдущем случае, минимальные значения звукоизоляции соответствуют образцам сэндвич-панели варианта состава (в), обращенным к источнику звука стороной с вибропоглощающим слоем, а максимальные – образцам с вибропоглощающим слоем, интегрированным в структуру одной из обшивок, практически независимо от расположения относительно источника звука.

Существенное отличие полученных данных от результатов исследования в области низких и средних частот заключается в том, что образцы сэндвич-панели, не содержащие вибропоглощающий слой, по величине звукоизоляции выше частоты 1600 Гц превосходят образцы с вибропоглощающим слоем, расположенным между стеклосотопластом и обшивкой, независимо от ориентации последних относительно источника звука.

Однако, вышеупомянутые образцы варианта состава (в), обращенные к источнику звука стороной с вибропоглощающим слоем, в области низких и средних частот имеют наибольшие значения коэффициента звукопоглощения (таблица 3.58).

Незначительно уступают им образцы сэндвич-панели с вибропоглощающим слоем, интегрированным в структуру одной из обшивок, также обращенные при испытании к источнику звука стороной с вибропоглощающим слоем. Наименьшие значения указанной характеристики имеют образцы вариантов состава (б) и (в), расположенные к источнику звука стороной, не содержащей вибропоглощающий слой. Промежуточное положение занимают образцы сэндвич-панели варианта состава (а), не содержащие вибропоглощающий слой.

В области частот выше 1600 Гц зависимость приобретает иной характер – аналогично результатам исследования звукоизоляции, максимальные значения коэффициента звукопоглощения имеют образцы с вибропоглощающим слоем, интегрированным в структуру одной из обшивок, расположенные к источнику звука противоположной стороной. Уступают им образцы варианта состава (в), причем также большие значения имеют расположенные к источнику звука стороной без вибропоглощающего слоя. Минимальные значения коэффициента звукопоглощения имеют экспериментальные образцы сэндвич-панели традиционного состава, не содержащие вибропоглощающий слой. При высоких частотах у всех

исследованных экспериментальных образцов композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем наблюдаются два максимума звукопоглощения - при частотах 2000 и 4000 Гц и участок его снижения в области 2000-3000 Гц.

Таблица 3.58 - Коэффициент звукопоглощения экспериментальных образцов композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем

Частота, Гц	Состав экспериментальных образцов				
	обшивка стеклосото- пласт обшивка (вариант (а))	обшивка стеклосотопласт вибропоглощающий слой (ВП) обшивка (вариант (в))		обшивка стеклосотопласт обшивка с внутренним вибропоглощающим (ВП) слоем (вариант (б))	
		Расположение образца к источнику звука			
		обшивкой	обшивкой с ВП слоем	обшивкой	обшивкой с ВП слоем
50	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
63	0,03	0,01	0,04	0,02	0,01
80	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
100	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
125	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
160	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03
200	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03
250	0,02	0,01	0,04	0,02	0,03
315	0,03	0,02	0,04	0,02	0,03
400	0,03	0,02	0,04	0,02	0,04
500	0,03	0,02	0,05	0,02	0,04
630	0,03	0,02	0,05	0,02	0,04
800	0,03	0,02	0,05	0,03	0,04
1000	0,03	0,02	0,05	0,02	0,04
1250	0,04	0,03	0,05	0,03	0,04
1600	0,05	0,03	0,06	0,04	0,05
2000	0,03	0,05	0,11	0,13	0,14
2500	0,03	0,05	0,08	0,12	0,11
3150	0,04	0,06	0,07	0,13	0,09
4000	0,07	0,08	0,09	0,14	0,10
5000	0,01	0,03	0,03	0,08	0,04
6300	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

В целом все экспериментальные образцы композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели различных вариантов имеют довольно низкие значения коэффициента звукопоглощения (0,01-0,14) и соответственно не могут быть рекомендованы для работы в качестве звукопоглощающих материалов.

Рассмотрено влияние состава композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели на ее теплофизические свойства.

Таблица 3.59 – Теплопроводность (λ) экспериментальных образцов композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели с интегрированным вибропоглощающим слоем

Средняя температура образца, °С	-20	0	+20	+40	+70
Состав экспериментальных образцов	Теплопроводность, Вт/(м·К)				
обшивка стеклосотопласт обшивка (вариант (а))	0,076	0,087	0,098	0,112	0,131
обшивка стеклосотопласт обшивка с внутренним вибропоглощающим слоем (вариант (б))	0,075	0,086	0,097	0,110	0,130
обшивка стеклосотопласт вибропоглощающий слой обшивка (вариант (в))	0,077	0,087	0,099	0,112	0,133

Из представленных в таблице 3.59 данных следует, что с увеличением температуры испытаний теплопроводность всех исследованных экспериментальных образцов композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели возрастает. При этом данный показатель практически не зависит от состава и структуры образцов (наличие вибропоглощающего слоя и его расположение). Вероятно, это происходит вследствие того, что вибропоглощающая прослойка внедряется во внутреннюю структуру и имеет слишком малую толщину, чтобы оказывать влияние на теплопроводность всей сэндвич-конструкции. По величине теплопроводности экспериментальные образцы композитной звуко-теплоизолирующей сэндвич-панели уступают материалам теплоизоляционного назначения, как правило, имеющим $\lambda=0,030-0,050$ в указанном диапазоне температур.

Из результатов исследования демпфирующих свойств, приведенных в таблице 3.60, следует, что максимальных значений коэффициент механических потерь вибропоглощающего слоя достигает в области температур от -20 до +20 °С, что соответствует температуре стеклования термопластичного полиуретана, из которого он выполнен. Обшивка сэндвич-

панели имеет невысокие значения данного показателя, которые практически не зависят от температуры испытаний.

Таблица 3.60 – Коэффициент механических потерь ($\text{tg}\delta$) вибропоглощающего слоя и обшивок экспериментальных образцов композитных звуко-теплоизолирующих сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем в интервале температур при частоте 100 Гц

Вид образцов	Коэффициент механических потерь							
	Температура, °C							
	-60	-40	-20	-0	20	40	60	80
Вибропоглощающий слой	0,110	0,190	0,290	0,330	0,240	0,170	0,130	0,110
Обшивка	0,046	0,060	0,062	0,071	0,072	0,067	0,070	0,062
Обшивка с внутренним вибропоглощающим слоем	0,046	0,058	0,161	0,230	0,230	0,211	0,209	0,220
Обшивка с вибропоглощающим слоем	0,059	0,080	0,230	0,260	0,221	0,200	0,200	0,240

Благодаря внедрению вибропоглощающего слоя в структуру обшивки ее демпфирующие свойства возрастают практически во всем исследованном диапазоне температур, при этом максимум вибропоглощения также соответствует области температуры стеклования термопластичного полиуретана, несколько смещенной в область положительных температур.

Нанесение вибропоглощающего слоя на обшивку также приводит к возрастанию коэффициента механических потерь, причем полученные значения превосходят показатели обшивки с интегрированным вибропоглощающим слоем. При этом максимальных значений $\text{tg}\delta$ составной конструкции также достигает в области температуры стеклования материала-основы вибропоглощающего слоя.

Полученные результаты исследования свидетельствуют о том, что вибродемпфирующие свойства элементов сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем определяются составом внедряемой вибропоглощающей прослойки.

Проанализировав результаты исследования вышеупомянутого комплекса свойств экспериментальных образцов композитных звуко-теплоизолирующих сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем в сравнении с сэндвич-панелями традиционного состава, можно сделать вывод о том, что внедрение вибропоглощающей прослойки в структуру трехслойной панели оказывает положительное влияние на ее звукоизоляцию и демпфирующие свойства ее элементов, однако приводит к возрастанию массы результирующей конструкции.

Таким образом, решение о целесообразности применения сэндвич-панелей с интегрированным вибропоглощающим слоем для изготовления панелей пола или интерьера летательных аппаратов должно приниматься конструкторами в зависимости от того, какое из свойств является приоритетным.

3.7 Влияние адгезионного слоя на свойства конструкции, включающей АВПМ и подложку из металла или ПКМ

Как правило, вибропоглощающие материалы не существуют в свободном состоянии, а используются в составе различных конструкций, подверженных действию вибрации. Поэтому целесообразно проводить оценку, например, их вибропоглощающих свойств на подложках, моделирующих вибрирующие поверхности. В таком случае оценивается коэффициент механических потерь составной конструкции – «материал + подложка».

В большинстве случаев ВПМ соединяются с вибрирующей поверхностью посредством склеивания, так как предусмотреть стадию их нанесения в процессе изготовления сложных технических систем не всегда представляется возможным.

В связи с этим, необходимо исследовать влияние клеевой прослойки на свойства полученных составных конструкций, например, влияние химической природы клея и толщины клеевого слоя на демпфирующие свойства составной конструкции АВПМ с подложкой из металла

Широкое распространение получили демпфирующие материалы с липким слоем (*damping tapes with pressure sensitive adhesive*), состоящие из вибропоглощающего адгезионного слоя (или вибропоглощающего и адгезионного слоев сопоставимых толщин) с защитной антиадгезионной пленкой с одной стороны и армирующего слоя, например, из фольги с противоположной стороны. Специфика применения подобных материалов заключается в том, что, во-первых, толщины вибропоглощающего, адгезионного и армирующего слоев уже заранее четко определены фирмой-производителем. Во-вторых, если вибропоглощающий слой одновременно является адгезионным, то такой ВПМ эффективен только в соответствующем температурном интервале (например, большинство клеев для высокотемпературного применения проявляют демпфирующие свойства в области высоких температур), определяемом

его термодинамическими характеристиками, что необходимо учитывать для требуемых условий работы.

Проследить влияние клеевых слоев с различными температурами стеклования и толщиной на демпфирующие свойства (коэффициент механических потерь) составной конструкции можно на примере классического двухслойного АВПМ (состоящего из слоя ТПУ и листа алюминиевого сплава), приклеенного на подложку из сплава Д-16АТ, моделирующую вибрирующую поверхность. Склеивание АВПМ с подложкой осуществляли при помощи клеев холодного отверждения на основе бутадиен-нитрильного, полиуретанового, силоксанового каучуков марок ВКР-27 ($T_g = -32,2 \dots -18,3$ °С), ВКР-24 ($T_g = -31,0 \dots -25,0$ °С) и ВКР-86 ($T_g = -48 \dots -44$ °С) соответственно. Толщину клеевого слоя варьировали от одного до трех нанесенных слоев клея и определяли по привесу массы.

Результаты исследования коэффициента механических потерь образцов вибропоглощающего материала марки ВТП-4В классического состава при частоте 100 Гц и в диапазоне температур от -60 до 80 °С с различным количеством слоев клеев приведены на рис. 3.20 – 3.22. Зависимости $\text{tg}\delta$ от температуры для клеев ВКР-24 и ВКР-27 (независимо от числа слоев клея) проходят через максимум (от -10 до 5 °С), соответствующий $T_{\text{tg}\delta\text{max}}$ вибропоглощающего материала ВТП-1В, имеющего T_g в области -35 °С. Однако образцы с клеем ВКР-24 имеют узкий температурный интервал эффективного вибропоглощения с высокими значениями $\text{tg}\delta$, тогда как для образцов с ВКР-27 наблюдается расширение $T_{\text{tg}\delta\text{max}}$ с одновременным снижением значений коэффициента механических потерь. Величина $\text{tg}\delta$ образцов с клеем ВКР-86 значительно ниже по сравнению с аналогичным показателем образцов с клеями ВКР-24 и ВКР-27, но для них также наблюдается широкий интервал $T_{\text{tg}\delta\text{max}}$.

Полученный эффект можно объяснить тем, что клеи ВКР-24 и ВКР-27 несмотря на различный химический состав, имеют близкие температурные области стеклования как между собой, так и с базовым материалом вибропоглощающего слоя – термопластичным полиуретаном, в то время как температура стеклования многокомпонентного клея ВКР-86 находится в температурной области почти на 20 °С ниже.

Из представленных на рисунках 3.18 – 3.20 данных также видно, что, судя по характеру расположения кривых зависимости $\text{tg}\delta$ от температуры, толщина клеевой прослойки каждого исследованного клея оказывает влияние на демпфирующие свойства образцов вибропоглощающего материала с армирующим слоем на металлической подложке. Например, с увеличением количества слоев клея ВКР-24 от одного до трех в области температур выше 0 °С величина коэффициента механических потерь возрастает, а в области отрицательных температур наибольшее значение $\text{tg}\delta$ соответствует двум слоям клея.

Аналогичная зависимость наблюдается при использовании клея ВКР-27, однако $\text{tg}\delta$ достигает наибольших значений, соответствующих двум слоям клея, во всем исследованном диапазоне температур. Иная картина наблюдается при склеивании поверхностей термопластичного полиуретана и подложки клеем ВКР-86: большему числу слоев клея (два и три) соответствуют меньшие значения коэффициента механических потерь, что может быть связано с многокомпонентным составом клея.

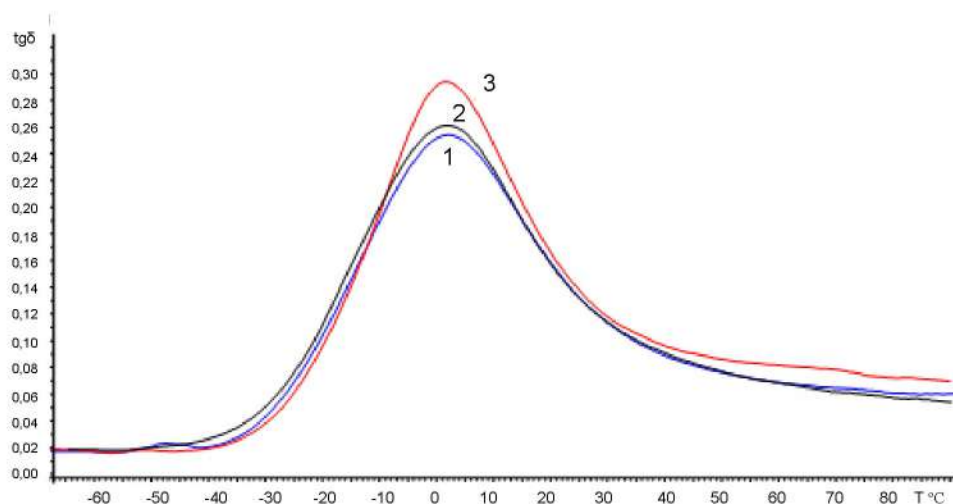


Рис. 3.18. Температурная зависимость коэффициента механических потерь вибропоглощающего материала ВТП-4В на подложке при частоте 100 Гц с различным числом слоев клея ВКР-24: 1 – один слой клея; 2 – два слоя клея; 3 – три слоя клея.

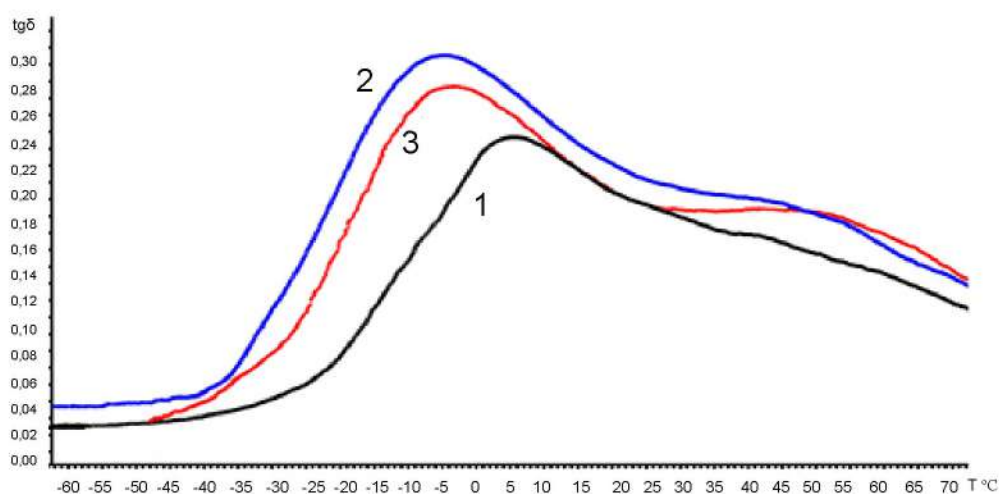


Рис. 3.19. Температурная зависимость коэффициента механических потерь вибропоглощающего материала ВТП-4В при частоте 100 Гц с различным числом слоев клея ВКР-27: 1 – один слой клея; 2 – два слоя клея; 3 – три слоя клея.

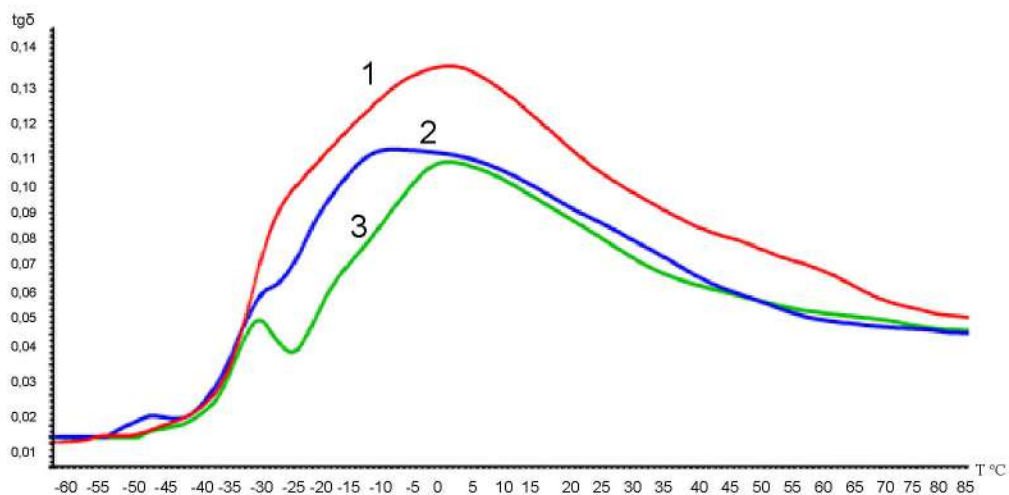


Рис. 3.20 Температурная зависимость коэффициента механических потерь вибропоглощающего материала ВТП-4В при частоте 100 Гц с различным числом слоев клея ВКР-86: 1 – один слой клея; 2 – два слоя клея; 3 – три слоя клея.

Таким образом, 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 (T_g). Также очевидно, что количество слоев клея определенной химической природы, наносимого при соединении вибропоглощающего материала с вибрирующей поверхностью, по-разному влияет на коэффициент механических потерь результирующей составной конструкции. В связи с этим при склеивании следует руководствоваться рекомендациями технической документации на проведение соответствующих процессов и учитывать, что с увеличением числа слоев клея возрастает привес на единицу площади поверхности.

3.8 Комплекс свойств разработанных материалов марок ВТП-3В и ВТП-1ВД в исходном состоянии

Разработанные листовый вибропоглощающий материал марки ВТП-3В и полимерный композиционный материал с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВТП-1ВД рекомендуются для применения в качестве покрытия различных конструкций и агрегатов, испытывающих одновременное воздействие вибрации и температуры до 180 °С и для изготовления деталей интерьера авиационной и других видов транспортной техники, работоспособных в диапазоне температур от минус 60 °С до плюс 80 °С соответственно.

Таблица 3.61. Физические и механические свойства разработанных вибропоглощающих материалов.

Наименование свойств	Показатели	
	ВТП-1ВД	ВТП-3В
Масса 1 м ² (поверхностная плотность), кг ГОСТ 17073-71	$\frac{4,95}{4,90 - 4,95}$	$\frac{0,95}{0,90 - 1,00}$
Влагопоглощение, М, % за 1 сут за 30 сут ГОСТ Р 56762-2015, ГОСТ 8971-59	0,08 0,27	5,20 13,90
Водопоглощение, С, % за 1 сут за 30 сут ГОСТ 4650-80	0,07 0,30	- -
Прочность связи между слоями при расслоении (межслойная адгезия), R, при T = 23 °С, Н/мм ГОСТ 6768-75	$\frac{4,7}{3,2 - 6,7}$	$\frac{2,0}{1,4 - 3,0}$
Прочность при изгибе, (изгибающее напряжение), σ_f МПа при минус 60 °С при 20 °С при 80 °С при 105 °С ГОСТ 4648-2014	$\frac{1370}{1190 - 1470}$ $\frac{515}{500 - 530}$ $\frac{340}{335 - 355}$ $\frac{240}{235 - 250}$	не определяется
Ударная вязкость по Шарпи без надреза, a_n , кДж/м ² ГОСТ 4647-2019	$\frac{350}{330 - 370}$	не определяется
Разрушающая нагрузка при растяжении, Н (при ширине образца 25 мм) ГОСТ 11262-80	не определяется	$\frac{4950}{4500 - 5150}$
Относительное удлинение при разрыве, % (при ширине образца 25 мм) ГОСТ 11262-80	не определяется	$\frac{8,7}{7,2 - 9,2}$
Примечание - в числителе среднее значение, в знаменателе минимальное и максимальное значение показателя		

Как видно из представленных в таблице 3.61 данных, вибропоглощающий материал – покрытие марки ВТП-3В является значительно более легким в сравнении со слоистым пластиком марки ВТП-1ВД, но при этом обладает большими показателями по накоплению влаги. Механические свойства исследованных материалов в основном отличаются по причине их различной структуры за исключением прочности связи между слоями – в данном случае большую межслойную адгезию имеет слоистый пластик марки ВТП-1ВД. Согласно данным таблицы 3.62, вибропоглощающий ПКМ имеет более высокую категорию горючести (трудногорающий) в сравнении с ВТП-3В, что также объясняется различиями в структуре.

Таблица 3.62 Горючесть вибропоглощающих материалов.

Материал	Наименование характеристики, НД (АП-25 Приложение F часть I, положение образца – вертикально)					
	Толщина, мм	Продолжительность экспозиции пламенем горелки, с	Продолжительность остаточного горения (тления), с	Длина обугливания, мм	Продолжительность горения капель, с	Классификация
ВТП-1ВД	3,35	60	0	32	нет	Трудногорающий
ВТП-3В	1,2±0,25	12	5	18	нет	Самозатухающий

Вибропоглощающие свойства материалов при различных температурах и частотах приведены в таблицах 3.63 – 3.65.

Таблица 3.63. Вибропоглощающие свойства* материала марки ВТП-3В в интервале температур и частот.

Наименование свойств	Частота, Гц	Температура испытания, °С						
		-60	-20	+20	+60	+100	+140	+180
Коэффициент механических потерь (tgδ)	100	0,1	0,16	0,17	0,16	0,15	0,13	0,10
	1000	0,11	0,17	0,20	0,19	0,17	0,15	0,11
Динамический модуль упругости, МПа	100	318	258	244	106	63	51	40
	1000	184	159	150	141	134	108	96

*в условиях сдвигового нагружения

Таблица 3.64. Вибропоглощающие свойства материала марки ВТП-1ВД в интервале частот.

Температура, °C	Наименование характеристики, НД		
	Коэффициент механических потерь $\text{tg}\delta$ в интервале частот (СТО 1-595-36-464-2015, трехточечный изгиб)		
	частота 100 Гц	частота 300 Гц	частота 500 Гц
-20	<u>0,110</u> 0,109-0,110	<u>0,063</u> 0,062-0,063	<u>0,053</u> 0,052-0,053
0	<u>0,150</u> 0,149-0,150	<u>0,150</u> 0,149-0,150	<u>0,072</u> 0,071-0,072
20	<u>0,093</u> 0,092-0,093	<u>0,170</u> 0,169-0,170	<u>0,110</u> 0,109-0,110

Таблица 3.65. Вибропоглощающие свойства материала марки ВТП-1ВД в интервале температур.

Частота, Гц	Наименование характеристики, НД						
	Коэффициент механических потерь $\text{tg}\delta$ в интервале температур (СТО 1-595-36-464-2015, трехточечный изгиб)						
	-60 °C	-40 °C	-20 °C	0 °C	20 °C	40 °C	80 °C
100	<u>0,061</u> 0,060-0,061	<u>0,052</u> 0,051-0,062	<u>0,061</u> 0,060-0,061	<u>0,140</u> 0,139-0,140	<u>0,120</u> 0,119-0,120	<u>0,076</u> 0,075-0,076	<u>0,054</u> 0,053-0,054
300	<u>0,064</u> 0,063-0,064	<u>0,059</u> 0,058-0,059	<u>0,071</u> 0,070-0,071	<u>0,150</u> 0,149-0,150	<u>0,150</u> 0,149-0,150	<u>0,099</u> 0,098-0,099	<u>0,057</u> 0,056-0,057
500	<u>0,060</u> 0,059-0,060	<u>0,052</u> 0,051-0,052	<u>0,052</u> 0,051-0,052	<u>0,093</u> 0,092-0,093	<u>0,099</u> 0,098-0,099	<u>0,054</u> 0,053-0,054	<u>0,052</u> 0,051-0,052

По результатам испытаний на коррозионную активность установлено, что ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВТП-1ВД может применяться в контакте с титановыми сплавами, нержавеющей стали. Конструкционные стали с гальваническими покрытиями, алюминиевые сплавы с анодно-окисными покрытиями, работающие в контакте с ВТП-1ВД, должны быть защищены системами ЛКП, выбранными в зависимости от условий эксплуатации с учетом расположения сборочной единицы в отдельных зонах изделия, имеющих возможные различные микроклиматические условия в соответствии с ПИ 1.2-011-2002, СТО 1 90368-86.

Материал марки ВТП-3В может применяться в контакте с титановыми сплавами и нержавеющей стали, конструкционными сталями с покрытиями, алюминиевыми сплавами

с анодно-окисными покрытиями. Выбор металлических материалов и покрытий в контакте с ВТП-3В должен производиться с учетом рабочих температур на основании ОСТ1 90368.

В результате работы разработаны:

- состав полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем и технология его изготовления, на которую выпущена технологическая рекомендация ТР 1.2.2664-2018 «Изготовление ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВПС-68/В», изм. № 1. Получен патент РФ 2687938 «Полимерный композиционный материал с интегрированным вибропоглощающим слоем» опублик. 16.05.2019.
- состав листового вибропоглощающего материала, выпущены ТУ 1-595-9-1074-2009 изм.2 «Материал листовой вибропоглощающий марки ВТП-3В» и технология его изготовления, на которую выпущена технологическая рекомендация ТР 1-595-9-786-2008 изм.2 «Изготовление листового вибропоглощающего материала ВТП-3В».

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 на термопластичную полиуретановую пленку Витур Т-0433-85 соответственно.

3.9 Практическая реализация результатов работы - применение разработанных вибропоглощающих материалов в составе сложных технических систем

Проведено опробование эффективности применения комплекса вибропоглощающих материалов марок ВТП-1В, ВТП-3В, ВТП-4В, СВПМ-А в конструкции транспортного средства - колесного вездехода «РУСАК» 4х4 (далее - ТС), рекомендованного для применения, в том числе, в условиях арктического климата.

Процесс монтажа вибропоглощающих материалов в конструкцию колесного вездехода включал подготовку поверхностей ТС (очистка, обезжиривание при помощи ацетона, зашкурирование), раскрой вибропоглощающих материалов, приклеивание вибропоглощающих материалов к поверхности элементов конструкции вездехода. Соединение вибропоглощающего материала марки ВТП-3В с поверхностью корпуса вездехода проводилось при помощи герметика ВИТЭФ-1Бм.

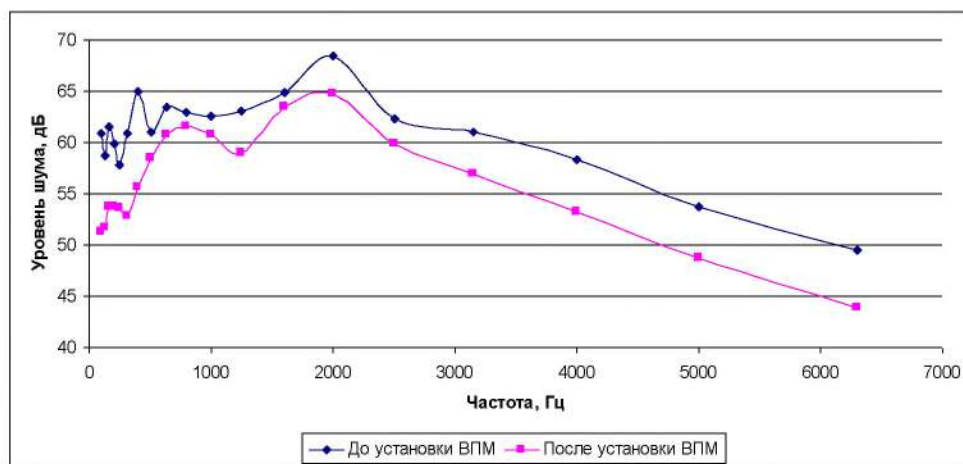
Результаты измерений уровня шума внутри ТС до и после установки комплекса вибропоглощающих материалов приведены в таблице 3.66 и на рисунке 3.21 (1-ая передача).

Из представленных в таблице 3.66 данных следует, что общий уровень шума возрастает при повышении передач и частоты оборотов двигателя. При этом максимальный эффект снижения общего уровня шума наблюдается на пониженной 1-ой передаче и составляет 4,4÷4,7 дБА, а при повышении передач снижение достигает 1,0÷2,2 дБА. Очевидно, что, как

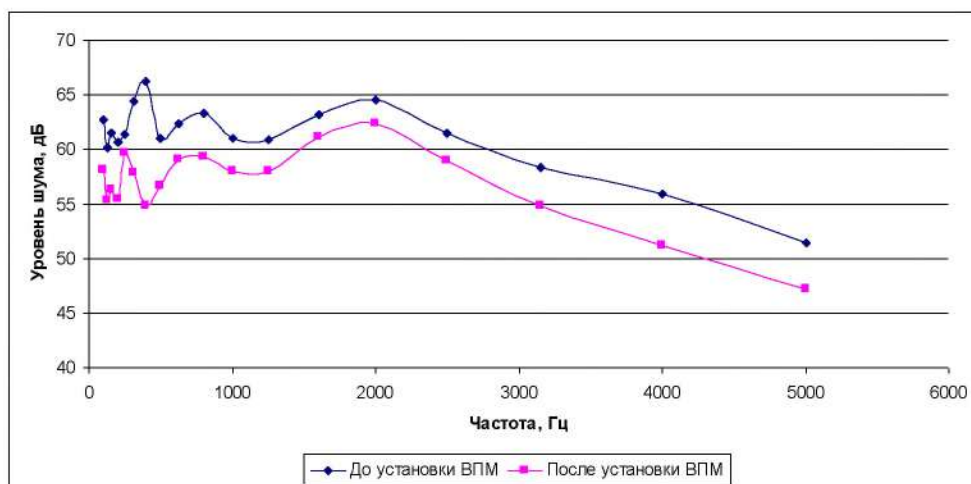
было показано выше, для усиления эффекта снижения общего уровня шума необходимо тщательно выбирать схему оптимального размещения ВПМ в конструкции ТС.

Таблица 3.66. Общий уровень шума (дБА) до и после установки ВПМ в конструкции колесного вездехода Русак.

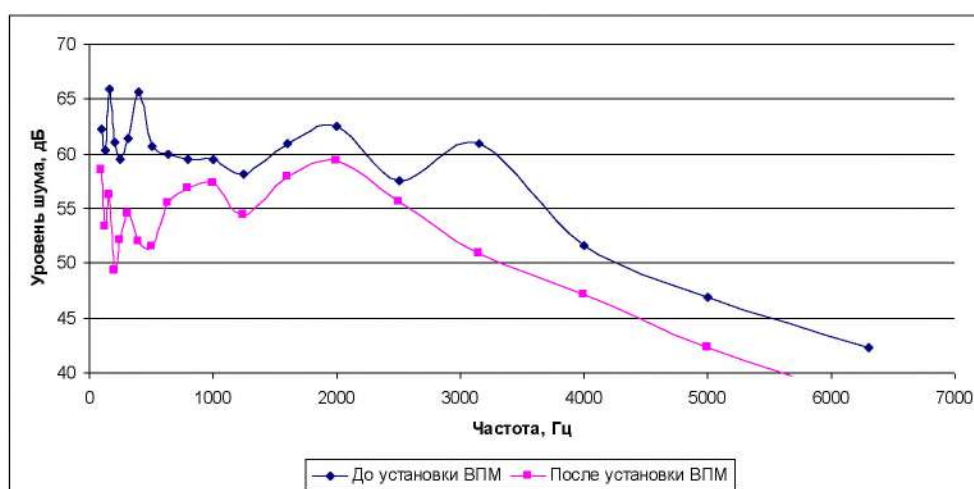
Обороты двигателя	1 передача		2 передача		3 передача		5 передача	
	до установки ВПМ	после установки ВПМ	до установки ВПМ	после установки ВПМ	до установки ВПМ	после установки ВПМ	до установки ВПМ	после установки ВПМ
1500 об/мин.	74,5	69,9	72,4	70,7	74,5	74,5	78,0	75,8
2000 об/мин.	76,6	72,2	74,9	73,1	76,6	75,5	81,5	80,5
2500 об/мин.	78,6	73,9	77,1	76,2	78,6	77,3	82,5	81,3
3000 об/мин.	82,2	77,6	80,1	79,1	82,2	81,4	85,0	83,6



(а)



(б)



(в)

Рисунок 3.21. Результаты измерения уровня шума внутри колесного вездехода Русак в диапазоне частот 100-6300 Гц на 1-ой передаче при частоте работы двигателя 1500 об/мин.: точки 1-3 (а), точки 4-6 (б), точки 7-9 (в).

Разработанный вибропоглощающий материал марки ВТП-3В был опробован в составе изделия АО «Компания «Сухой» в качестве звуко- и вибропоглощающего покрытия на стенках кабины пилота.

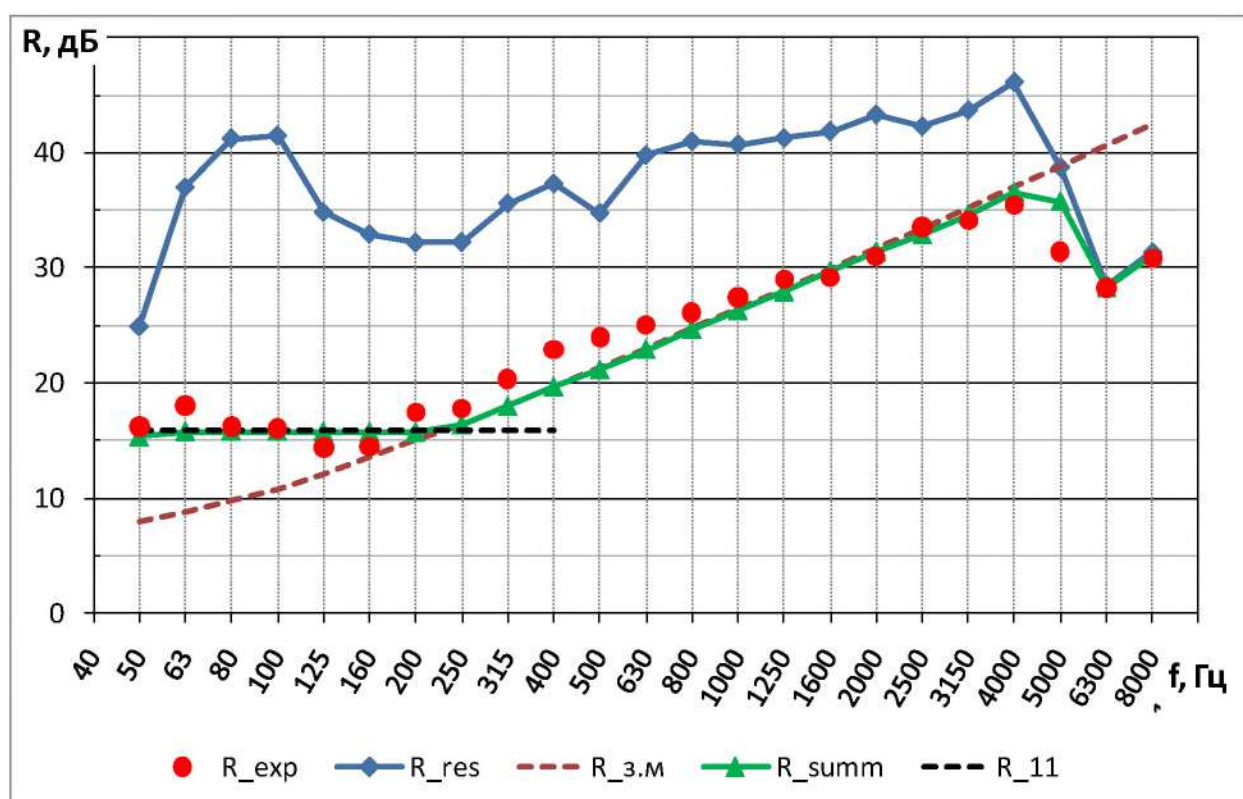
По результатам проведенных испытаний изделия АО «Компания «Сухой» с установленным в его конструкции комплексом вибропоглощающих материалов марок ВТП-1В, ВТП-2В и ВТП-3В получено снижение уровня шума и вибраций в кабине пилота до допустимых значений.

По результатам испытаний разработанный материал принят для применения в конструкции изделий АО «Компания «Сухой» (исх. № 1/452091/703 от 19.08.2021).

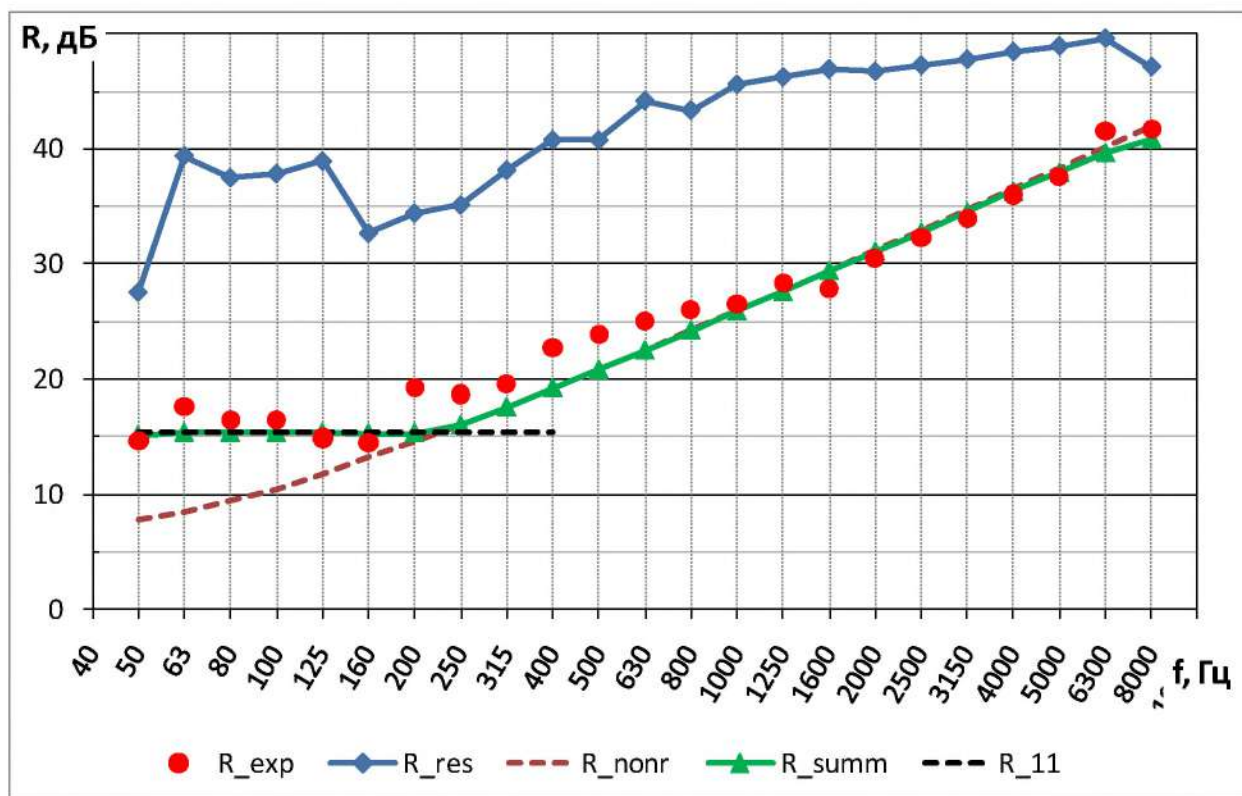
ФГУП «ЦАГИ» ГНЦ РФ проведено исследование звукоизоляции панелей из разработанного полимерного композиционного материала с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВТП-1ВД в сравнении со стеклопластиком марки ВПС-47 толщиной 2,7 мм. Определены значения звукоизоляции двух указанных панелей, рассчитанные по закону масс.

На основании измеренных значений виброакустических характеристик панелей была рассчитана «резонансная» составляющая звукоизоляции и проведено сопоставление ее рассчитанных значений суммарной звукоизоляции с измеренными. На рисунке 3.22 приведено сравнение для панели из стеклопластика ВПС-47 (а) и для панели ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВТП-1ВД (б). В обоих случаях наблюдается хорошее соответствие между измеренной суммарной звукоизоляцией и рассчитанной на основе виброакустических характеристик.

В результате проведенных исследований установлено, что в окрестности частоты 6,3 кГц звукоизоляция панели из стеклопластика резко снижается, а звукоизоляция панели из ВТП-1ВД продолжает увеличиваться в соответствии с законом массы. Это объясняется тем, что для панели с высоким демпфированием ее звукоизоляция определяется исключительно нерезонансным прохождением звука. В области частот ниже критической звукоизоляция панели из ВТП-1ВД на 3-10 дБ выше панели из ВПС-47.



(а)



(б)

Рисунок 3.22 – Сравнение рассчитанной суммарной ЗИ и ее составляющих с измеренной: (а) панель из стеклопластика ВПС-47 и (б) панель из ПКМ с интегрированным вибропоглощающим слоем марки ВТП-1ВД.

Таким образом установлено, что разработанный материал марки ВТП-1ВД является перспективным для изготовления панелей интерьера самолетов с повышенными вибропоглощающими и звукоизоляционными свойствами (исх. № 87-10/252 от 24.08.2021).

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 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, 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 «Полимерный композиционный материал с интегрированным вибропоглощающим слоем» опубл. 16.05.2019.

Список литературы

1. Соломатов В.И., Черкасов, Фомин Н.Е. Вибропоглощающие композиционные материалы // Саранск: Изд-во Мордовского Университета. – 2001.
2. Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Надькин Е.А. Вибропоглощающие материалы экстра-класса // Саранск: Изд-во Мордовского Университета. – 2007.
3. Duffy J.V., Lee G.F., Lee J.D., Hartmann B. Dynamic mechanical properties of poly(tetramethylene ether) glycol polyurethanes: effect of diol-chain extender structure // Sound and Vibration Damping with Polymers. Washington DC: American Chemical Society Symposium Series 424. – 1990. – p. 281-301.
4. Незвицкая Н.Н. Разработка олигомер-эластомерных композиционных вибропоглощающих материалов конструкционного назначения // Санкт-Петербург: 2000.
5. Hartmann B. Relation of polymer chemical composition to acoustic damping // Sound and Vibration Damping with Polymers. Washington DC: American Chemical Society Symposium Series 424. – 1990. – p. 23-49.
6. Аксадский А.А., Лучкина Л.В., Никифорова Г.Г., Коврига О.В. Вибропоглощающие градиентные полимерные материалы // Пластические массы. – 2007. - №4. – с. 30-33.
7. Interpenetrating polymer network acoustic damping material: pat. 5225498 US; publ. 06.07.1993.
8. Chip resistant, vibration damping coatings for vehicles: pat. 6153709 US; publ. 28.11.2000.
9. Померанцев В.И., Панкова Г.А. Сополимеры и их роль при создании новых вибропоглощающих материалов // Материалы семинара. – 1990.
10. Ионов А.В. Средства снижения вибрации и шума на судах // Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ им.акад. А.Н.Крылова. – 2000.
11. Бартенев Г.М. Структура и релаксационные свойства эластомеров // М.: Химия. – 1979.
12. Sorathia U., Yeager W., Dapp T. Advanced damping materials for marine applications // Sound and Vibration Damping with Polymers. Washington DC: American Chemical Society Symposium Series 424. – 1990. – p. 382-397.
13. Ting R.Y., Capps R.N., Klempner D. Acoustical properties of some IPN polymers: urethane-epoxy networks // Sound and Vibration Damping with Polymers. Washington DC: American Chemical Society Symposium Series 424. – 1990. – p. 366-382.
14. Fay J.J., Murphy C.J., Thomas D.A., Sperling L.H. Cross-poly(vinylmethyl ether)-inter-cross-polystyrene IPN: loss modulus and damping behavior // Sound and Vibration Damping with Polymers. Washington DC: American Chemical Society Symposium Series 424. – 1990. – p. 415-431.
15. Roland C.M., Trask C.A. Damping in polydiens // Sound and Vibration Damping with Polymers. Washington DC: American Chemical Society Symposium Series 424. – 1990. – p. 301-317.
16. Gandhi F., Austruy J. Constrained-layer damping with gradient polymers for effectiveness over broad temperature ranges // AIAA Journal. 2007. Vol. 7. P. 35–38.

17. Полимерная вибропоглощающая композиция и слоистый вибропоглощающий материал на ее основе: пат. 2285023 Рос. Федерация. № 2005103140/04; заявл. 09.02.05; опубл. 10.10.06.
18. Capps Rodger N., Beumel Linda L. Application of polymer development to constrained-layer damping // Sound and Vibration Damping with Polymers. Washington DC: American Chemical Society Symposium Series 424. – 1990. – p. 63-78.
19. Vibration damping composite material: appl. 2004/291408 US; publ. 21.10.2004.
20. Composite damping layer, constrained by thin layer and method of making same: pat. 104527173 CN, publ. 22.04.2015.
21. Vibration damping coating: pat. 7360997 US, publ. 22.04.2008.
22. Polyurethane elastomers: pat. 7307136 US, publ. 11.12.2007.
23. Смотров С.А. Анализ вибропоглощающих свойств полимерных материалов с целью оценки возможного их применения в конструкциях демпферов и динамически подобных моделей // Пластические массы. – 2002. - №3. – с. 39-45.
24. Кузнецов В.М. Проблемы снижения шума пассажирских самолетов // Акустический журнал. – 2003. – Том 49. - №3. – с. 293-317.
25. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aircraftspruce.com>. (Дата обращения: 06.07.2021).
26. Type Acceptance Report TAR 95/01 — ATR42/72 Series 4 Rev.1 – 7 September, 2012.
27. Баранников А.А., Вешкин Е.А., Постнов В.И., Стрельников С.В. К вопросу производства панелей пола из ПКМ для летательных аппаратов (обзорная статья) // Известия Самарского научного центра РАН. т.19. № 4(2). 2017. С. 198-212.
28. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.earsglobal.com>. (Дата обращения: 06.07.2021).
29. Integrally damped composite aircraft floor panels: pat. 7419031 B2 US; publ. 02.09.2008.
30. Vibration damping wing-to-body aircraft fairing: pat. 8292214 US; publ. 23.10.2012.
31. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.damping.com>. (Дата обращения: 06.07.2021).
32. 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.
33. Parfitt G., Lambert D. The damping of structural vibration // Aeronaut Res.Council Current Paper. – 1962. - №596.
34. Miller L.N., Beranek L.L., Sternfield H. Acoustical design for transport helicopters // Noise control. – 1959. – v.5. - №2.
35. Sternfield H. New techniques in helicopter noise reduction // Noise control. – 1961. – v.7. - №3.
36. Ungar E. Damping tapes for vibration control // Product engineering. – 1960. – v.31. - №4.
37. Ross D., Ungar E., Kerring E. Damping of plate flexural vibration by means of viscoelastic laminate // Structure damping Pergamon Press. – 1960. – №4.
38. Optimization of viscoelastic damping materials for specific structural composite applications // Dayton. - Program of 2nd INT Conf. – 1965.
39. Наумкина Н.И. Исследование некоторых вибропоглощающих пластмасс // Сборник «Борьба с шумом и вибрациями» М.: Стройиздат. – 1968.

40. Наумкина Н.И. Вибропоглощающие мастичные материалы // Труды VI Всесоюзной акустической конференции М.: Стройиздат. – 1968.
41. Липковязкий состав для вибропоглощающих покрытий: пат. А.С. СССР №39394; публ. 08.11.1967.
42. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.antiphon.se>. (Дата обращения: 06.07.2021).
43. Vibration damping composite material: pat. 6830793 US; publ. 21.11.2002.
44. Way of improving the acoustic comfort inside the vehicle interior: appl. 2012085961 US; publ. 12.04.2012.
45. Energy absorbing compositions based on ester and ether copolymers resins: appl. 2011017248 WO; publ. 10.02.2011.
46. Layered and composite gradient structures with improved vibration damping properties: appl. 2012164907 US; publ. 28.06.2012.
47. Preparation method of damping component: pat. 8097194 US; publ. 17.01.2012.
48. Damped structural panel and method of making the same: pat. 6266427 US; publ. 24.07.2001.
49. Vibration damping materials and soundproof structures based on them: pat. 5063098 US; publ. 05.11.1991.
50. Vibration damping material: pat. 5213879 US; publ. 25.05.1993.
51. Vibration damped sandwich systems having interlayers of vinyl acetate-ethylene copolymers: pat. 3640836A US; publ. 08.02.1972.
52. Vibration-damping sheet metal laminates: pat. 3847726 US; publ. 12.11.1974.
53. Noise control materials: pat. 4048366 US; publ. 13.09.1977.
54. Method of forming noise-damping material with ultra-thin viscoelastic layer: pat. 6202462 US; publ. 20.03.2001.
55. Sheet molding compound damper component, and methods for making and using the same: pat. 7172800 US; publ. 06.02.2007.
56. Oosting N.J., Hennessy J., Hanner D.T. Application of a Constrained Layer Damping Treatment to a Cast Aluminum V6 Engine Front Cover // Society of automotive engineers. New York. 2005. P. 2286.
57. Constrained layer damper, and related methods: pat. 8377553 B2 US; publ. 19.02.2013.
58. Structural composite material with improved acoustic and vibrational damping properties: pat. 2010170746 US; publ. 08.07.2010.
59. Multilayer and composition gradient structures with improved damping properties: appl. 2012164907 US; publ. 28.06.2012.
60. Vibration damping material: pat. 2011314589 US; publ. 29.12.2011.
61. Vibration damping material: pat. 6942586 US; publ. 13.09.2005.
62. Vibration damping material and method of making thereof: pat. 8142382 US; publ. 27.03.2012.
63. Damped structural panel and method of making same: pat. 6266427 US; publ. 23.07.2001.
64. Leaf spring for transport: appl. 63225738 A JPH; publ. 20.09.1988.
65. Vibration damping trim: appl. 01150038 A JPH; publ. 13.06.1989.
66. Manufacturing of fiber-reinforced composite material: appl. 02209235 A JPH; publ. 20.08.1990.
67. Vibration damping and soundproof trim: appl. 02276629 A JPH; publ. 13.11.1990.

68. Manufacturing of fiber-reinforced composite material: appl. 03166921 A JPH; publ. 18.07.1991.
69. Fiber reinforced composite material and a process for the production thereof: pat. 5487928 US; appl. 29.06.92; publ. 30.01.1996.
70. 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.
71. Kishi Hajime, Kuwata Manabu, Matsuda Satoshi, Asami Toshihiko, Murakami Atushi. Damping properties of thermoplastic-elastomer interleaved carbon fiber-reinforced epoxy composites // *Composites Science and Technology*, 2004. Vol. 64. No.16. P. 2517-2523.
72. Fotsing ER, Sola M., Ross A., Ruiz Edu. Dynamic characterization of viscoelastic materials used in composite structures // *Journal of Composite Materials*. 2013. Vol. 48. No. 30. P. 3815-3825.
73. Soundproofing trim panel for helicopter type rotorcraft, has core that is melamine self-extinguishing foam in which inserts are arranged, and skins provided with carbon cloth layers respectively: pat. 2939406B1 FR; app. 12.05.2008; publ. 12.07.2013.
74. Sandwich panel: pat. 2006002869A JP; filed 18.06.2004; publ. 05.01.2006.
75. Fiber-reinforced composite material and molding thereof: appl. 2016210027A JP; publ. 15.12.2016.
76. Energy absorbing thermoplastic elastomer: appl. 8051947 US; publ. 08.11.2011.
77. Prepreg, fiber-reinforced composite material and method of producing the prepreg: appl. 2012011487A1 JPWO; publ. 09.09.2013.
78. Manufacturing method for fiber-reinforced plastic production: pat. 2015193751 JP; publ. 22.02.2018.
79. Composite article including viscoelastic layer with barrier layer: pat. 2010151186 US; publ. 17.06.2010.
80. Панель звукоизолирующая: пат. 2472649 RU; публ. 20.01.2013.
81. Sandwich damping composite material: pat. 102179978 CN; publ. 14.09.2011.
82. Fiber reinforced resin composite material: appl. 2012139841 JP; publ. 26.07.2012.
83. Fiber-reinforced composite material: appl. 3127694 EP; publ. 08.02.2017.
84. Композиционный материал для изготовления виброудароизоляторов: пат. 2353527 RU; публ. 27.04.2009.
85. E.R. Fotsing, M. Sola, A. Ross, Edu Ruiz Lightweight damping of composite sandwich beams: Experimental analysis // *Journal of Composite Materials*. 2013. Vol. 47. No 12. P. 1501-1511.
86. Модифицированная многослойная виброшумодемпфированная композитная структура: пат. 2465143 RU; публ. 27.10.2012.