

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ» НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ЦЕНТРА «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

На правах рукописи

СТАРКОВ АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ

**ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПОНИЖЕННОЙ
ГОРЮЧЕСТИ НА ОСНОВЕ КЛЕЕВЫХ ПРЕПРЕГОВ**

**Специальность 2.6.11 «Технология и переработка синтетических и
природных полимеров и композитов»**

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
к.т.н. Куцевич К.Е.**

МОСКВА – 2025

Выражаю благодарность своему научному руководителю кандидату технических наук Куцевичу Кириллу Евгеньевичу и доктору технических наук, профессору Петровой Алефтине Петровне сподвигнувшей на написание данной работы.

Выражаю особую благодарность кандидату технических наук Лукиной Наталье Филипповне, доктору технических наук Барботько Сергею Львовичу и кандидату технических наук Антюфеевой Наталье Викторовне за консультативную помощь. Высоко ценю ваш профессионализм и готовность всегда прийти на помощь.

Благодарю коллектив научно-исследовательского отделения «Функциональные материалы и технологии синтеза» и всех коллег института за помощь в проведенных исследованиях, анализе полученных результатов и консультациях.

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Литературный обзор	12
1.1. Полимерные композиционные материалы авиационного назначения. Основные сведения	12
1.2. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стекловолоконистых наполнителей	14
1.3. Характеристика наполнителей для ПКМ.....	15
1.3.1. Общая характеристика углеродных волокон.....	17
1.3.2. Общая характеристика стеклянных волокон.....	22
1.4. Основные типы связующих для ПКМ.....	24
1.5. Клеящие материалы авиационного назначения на основе эпоксидных олигомеров.....	26
1.6. Пути снижения пожароопасности полимерных композиционных материалов	31
1.7. Типы конструкций из ПКМ и технологии их изготовления	33
Глава 2. Объекты и методы исследования	37
2.1. Объекты исследований.....	37
2.2. Методы исследований.....	38
2.2.1. Термический анализ	38
2.2.2. Микроструктурные исследования	40
2.2.3. Физико-механические испытания.....	40
2.2.4. Определение характеристик пожаробезопасности	42
2.2.5. Определение устойчивости к воздействию внешних факторов	43
Глава 3. Экспериментальная часть.....	45
3.1. Обоснование выбора связующего пониженной горючести	45
3.2. Исследование реокинетических свойств клеевого связующего марки ВСК-14-6...	47
3.3. Разработка составов клеевых препрегов угле-стеклопластиков пониженной горючести на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6	53

3.4. Исследование кинетики реакций отверждения клеевых препрегов угле-стеклопластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6	62
3.4.1. Исследование и корректировка режима отверждения клеевых препрегов угле-стеклопластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 применительно для сотовых конструкций	70
3.5. Разработка и исследование свойств полимерных композиционных материалов (угле- и стеклопластика) на основе клеевых препрегов.....	72
3.5.1. Исследование микроструктуры угле-стеклопластиков	72
3.5.2. Исследование горючести, дымообразования, токсичности	80
3.5.3. Исследование характера изменения свойств полимерных композиционных материалов при воздействии внешних факторов.....	92
3.5.3.1. Исследование характера изменения свойств углепластика марки ВКУ-59 при воздействии внешних факторов	92
3.5.3.2. Исследование характера изменения свойств стеклопластика марки ВПС-68 при воздействии внешних факторов	98
Глава 4. Разработка технологий изготовления клееных конструкций с применением разработанных полимерных композиционных материалов.....	103
4.1. Разработка технологии изготовления и исследование свойств конструктивно-подобных образцов панелей пола трехслойной сотовой конструкции	103
4.2. Разработка технологии изготовления и исследование свойств толстостенной панели из углепластика марки ВКУ-59	111
Глава 5. Практическая реализация полученных в работе результатов	117
Выводы.....	119
Список сокращений и обозначений.....	122
Список литературы.....	123
Приложение 1	135
Решение о внедрении	135

Введение

Актуальность работы

Тенденция повышения доли полимерных композиционных материалов в конструкции современной авиационной техники, включая их совместное использование с различными наполнителями, связана с ростом требований к упругим и прочным характеристикам конструкционных материалов, а также к экономической, энергетической и весовой эффективности готового изделия. С точки зрения эффективности по весу наиболее целесообразно сосредотачиваться на уменьшении массы компонентов конструкции, которые составляют существенную часть воздушного судна, например, таких компонентов, как интерьер. К примеру, площадь использования панелей в отделке стен, потолка и пола пассажирской кабины и багажно-грузового отсека в пассажирских магистральных самолетах составляет несколько сотен квадратных метров, и масса одного квадратного метра варьируется в пределах от 1,5 до 4 кг в зависимости от функционального назначения панели. Широкое применение трехслойных сотовых панелей из ПКМ, состоящих из двух обшивок, сотового наполнителя и скрепленных между собой с использованием высокопрочного пленочного клея, способствовало значительному увеличению весовой эффективности конструкций самолетов.

Помимо повышенных прочностных характеристик, для материалов, применяемых в интерьере воздушных судов и других транспортных средств, имеют значение дополнительные требования к пожарной безопасности в пределах рабочих температур. Эти требования особенно актуальны в связи с заменой на полимерные композиционные материалы металлических компонентов, что обеспечивает снижение массы, но в то же время ПКМ являются потенциально пожароопасными. При разработке нового поколения самолетов, в которых планировалось использовать больше полимерных композиционных материалов, стояла задача создания материалов с новым набором свойств, отвечающих жестким требованиям, включая пожаробезопасность (при использовании полимерных композиционных материалов в авиационном интерьере) и

обеспечивающих работу изделий в различных климатических условиях. Кроме пожаробезопасности, этим требованиям удовлетворяют полимерные композиционные материалы на основе клеевых препрегов, где тканевый наполнитель насыщен клеевым эпоксидным связующим в расплавленном состоянии. Используя различные отечественные и зарубежные наполнители - углеродные ленты, ткани и стекловолоконные наполнители, включая высокомодульные, клеевые препреги позволяют разнообразить свойства конечного полимерного композиционного материала в значительном диапазоне.

Клеевые препреги на основе клеевых связующих обладают реологическими параметрами, сопоставимыми с традиционными связующими, но отличаются тем, что обладают клеевыми свойствами. Благодаря этой комбинации, клеевые препреги обеспечивают высокоэффективный процесс сборки клеевых конструкций из неметаллических материалов, включая сотовые структуры простой и сложной формы, где формирование обшивки и ее склеивание с сотовым наполнителем происходит одновременно в рамках одной технологической операции. Эта техника также позволяет создавать как трёх- и многослойные сотовые конструкции, так и интегральные или комбинированные детали, объединяя сотовые и монолитные элементы, изготовленные методами автоклавного и прямого прессования в зависимости от требований и поставленных задач.

Полимерные композиционные материалы марок КМКС и КМКУ, разработанные в ВИАМ (в настоящее время – Национальный исследовательским центр «Курчатовский институт»), получили широкое применение в авиационной технике, однако, они имеют невысокий уровень пожарной безопасности, что ограничивает их использование в авиационном интерьере (в частности для панелей пола). Для обеспечения безопасности пассажиров и грузов в процессе использования авиационной техники необходимо использование полимерных материалов с повышенным уровнем пожарной безопасности и прочностных свойств, соответствующих авиационным правилам пожарной безопасности в соответствии с главами авиационных норм АП-25 и НЛГ 25.

Цель работы – разработка состава и технологии изготовления клеевых препрегов и полимерных композиционных материалов (угле- и стеклопластиков) пониженной горючести на их основе и с теплостойкостью не ниже 80°С.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

- разработать составы и технологии изготовления клеевых препрегов для ПКМ пониженной горючести;
- определить оптимальные условия формирования структуры полимерных композиционных материалов (угле- и стеклопластика) в процессе отверждения клеевого связующего в составе клеевого препрега;
- исследовать и установить свойства ПКМ (пожаробезопасность, характер изменения свойств при воздействии внешних факторов);
- исследовать влияние режима формования и разработать технологию изготовления толстостенной конструкции пониженной горючести на основе углепластика и исследовать её свойства;
- исследовать влияние режима формования и разработать технологию изготовления трехслойных сотовых конструкций пониженной горючести, предназначенных для изготовления панелей пола.

Научная новизна диссертации:

1. На основании проведенных исследований разработаны научно обоснованные температурно-временные параметры режимов формования монолитных, в том числе толстостенных, и трехслойных сотовых конструкций из клеевых угле- и стеклопрепрегов на основе связующего ВСК-14-6, с оптимальными характеристиками вязкости в процессе его отверждения и обеспечивающие высокий уровень прочностных характеристик конструктивных элементов за счет равномерного распределения связующего по объёму ПКМ и формирования качественных галтелей в трехслойных сотовых панелях.

2. Установлено, что за счет сочетания оптимальных реологических характеристик клеевого связующего пониженной горючести ВСК-14-6 (вязкость

20 – 30 Па·с при 80 °С в течение 5 часов) с установленными режимами формования, вследствие пропитки межволоконного пространства без воздушных пор, достигается синергический эффект огнезащиты, обеспечивающий защиту внутренних слоев конструкции от воздействия открытого пламени и повышенный уровень пожарной безопасности.

Основные положения, полученные лично автором и выносимые на защиту

1. Составы композиционных материалов пониженной горючести на основе клеевых препрегов с различным соотношением содержания связующего и угле- и стеклонаполнителя в зависимости от типа конструкций (монолитных или сотовых).

2. Технология изготовления прецизионных калиброванных клеевых препрегов, обеспечивающая минимальный разброс по содержанию клеевого связующего в клеевом препреге (не более $\pm 2\%$).

3. Технология изготовления композиционных материалов (углепластика и стеклопластика) пониженной горючести из клеевых препрегов на основе клеевого связующего пониженной горючести с теплостойкостью 80 °С и угле- и стеклонаполнителя, в том числе монолитной, толстостенной и сотовой конструкции, методом автоклавного формования.

4. Результаты исследования комплекса физико-механических и функциональных свойств композиционных материалов (углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68) в составе образцов монолитной и трехслойной сотовой конструкции.

5. Результаты исследования свойств конструктивных образцов толстостенной конструкции и трехслойной сотовой конструкции панелей пола с обшивками из клеевых препрегов.

Личный вклад автора

Методическая постановка работы, непосредственное участие в работах по выбору клеевого связующего марки ВСК-14-6 пониженной горючести,

исследованию его реологических характеристик, выбору угле- и стеклонаполнителей, разработке технологии изготовления клеевых препрегов, разработке технологических режимов изготовления клеевых композиционных материалов (угле- и стеклопластика) пониженной горючести на основе клеевых препрегов, разработке режимов изготовления монолитных толстостенных и трехслойных сотовых конструкций, в том числе сотовых конструкций панелей пола, за один технологический цикл, обработке экспериментальных данных, составлении выводов на основании их анализа.

Теоретическая значимость работы

Установлена связь между составом, реологическими свойствами клеевого связующего пониженной горючести и температурно-временными параметрами технологического процесса переработки клеевого препрега, изготовленного на его основе, которые обеспечивают формирование оптимальной структуры композиционного материала в процессе изготовления изделий монолитной и сотовой конструкции.

Практическая значимость работы

1. Разработана технология изготовления клеевого препрега углепластика марки ВКУ-59 на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 с теплостойкостью 80°C и углеродного жгутового наполнителя марки УВ-12К и оформлена следующая документация: ТИ 1.595-11-1173-2018, ТУ 1-595-11-1775-2018, ТУ 1-595-УНТЦ-1930-2021 «Заготовки панелей пола из полимерных композиционных материалов». Оформлен паспорт № 1994 на углепластик ВКУ-59.

2. Разработана технология изготовления клеевого препрега стеклопластика марки ВПС-68 на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 с теплостойкостью 80°C и стеклоткани Т-60/2(ВМП) и оформлена следующая документация: ТИ 1.595-11-1174-2018, ТУ 1-595-11-1776-2018. Оформлен паспорт № 1995 на стеклопластик ВПС-68.

3. Разработана технология изготовления монолитных и трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из клеевых препрегов и оформлена

ТР 1.2.2757-2019 «Изготовление монолитных и трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из клеевых угле- и стеклопрепегов на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6».

4. Организован серийный выпуск разработанных клеевых препегов на сертифицированном производстве НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

5. Оформлено Решение № 11424-0182-143 об организации изготовления и поставки трехслойных сотовых заготовок панелей пола из полимерных композиционных материалов (углепластик марки ВКУ-59 и стеклопластик марки ВПС-68) производства НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

6. Углепластик марки ВКУ-59 и стеклопластик марки ВПС-68 внесены в конструкторскую документацию самолетов Ил-114-300 и Ил-76МД-90А для изготовления заготовок панелей пола на основе разработанных материалов.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием аттестованного, поверенного современного оборудования при проведении экспериментов.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на конференциях:

- Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». Москва, 2019 г.,

- Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы нового поколения и технологии их переработки», Москва, 2020 г.,

- VI Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения», Москва, 2022 г.,

- XXIII Международная научно-техническая конференция «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов», Обнинск, 2024 г.,

- VIII Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные

композиционные материалы и производственные технологии нового поколения», Москва, 2024 г.

Публикации

По результатам диссертации опубликовано 13 научных работ, из них 4 в изданиях, входящих в перечень ВАК, 1 в журнале, включенном в международную систему цитирования Web of Science и Scopus и 1 патент РФ.

Глава 1. Литературный обзор

1.1. Полимерные композиционные материалы авиационного назначения. Основные сведения

Композитные материалы – это материалы с матрицей из металлов, неметаллов или полимеров, в которой равномерно распределены упрочняющие элементы, такие как волокна и дисперсные частицы. Использование таких материалов позволяет комбинировать уникальные свойства каждого компонента, изменяя их содержание для достижения нужных характеристик, включая прочность, жаропрочность и абразивную стойкость. Композиты объединяют разнообразные конструкционные и специальные свойства, которые часто недоступны для традиционных материалов, таких как металлы, керамика и углеродные соединения [1].

Для полимерных композитов используются разнообразные наполнители, такие как ткани, ленты, нити из различных видов волокон и монокристаллов стекла, углерода, бора, бериллия, органических материалов с высокой прочностью и модулем упругости, а также дисперсные частицы различной природы. Полимерные смолы, включая эпоксидные, фенолформальдегидные, кремнийорганические и полиамидные композиты, широко применяются как связующие в производстве деталей и изделий. Выбор материала для матрицы определяет рабочий диапазон температур, сохранение свойств при воздействии высоких температур, агрессивных сред и других факторов, а также процессы получения и обработки материала [2-4].

Основное преимущество полимерных композитов перед металлами – это высокая удельная прочность и модуль упругости при более низкой плотности [5]. Именно поэтому происходит постоянное замещение металлических элементов в конструкциях в авиации, например, алюминиевых сплавов, композиционными материалами. Это связано с необходимостью соблюдения экологических требований и увеличением экономической эффективности воздушных судов. Накопленный опыт в области использования различных видов пластиков

постепенно увеличивает область их применения в производстве разнообразных конструкций [6-9]. Такая тенденция наблюдается и в современной авиационной промышленности, где доля композитных материалов в общей массе воздушных судов постоянно растет (рисунок 1).

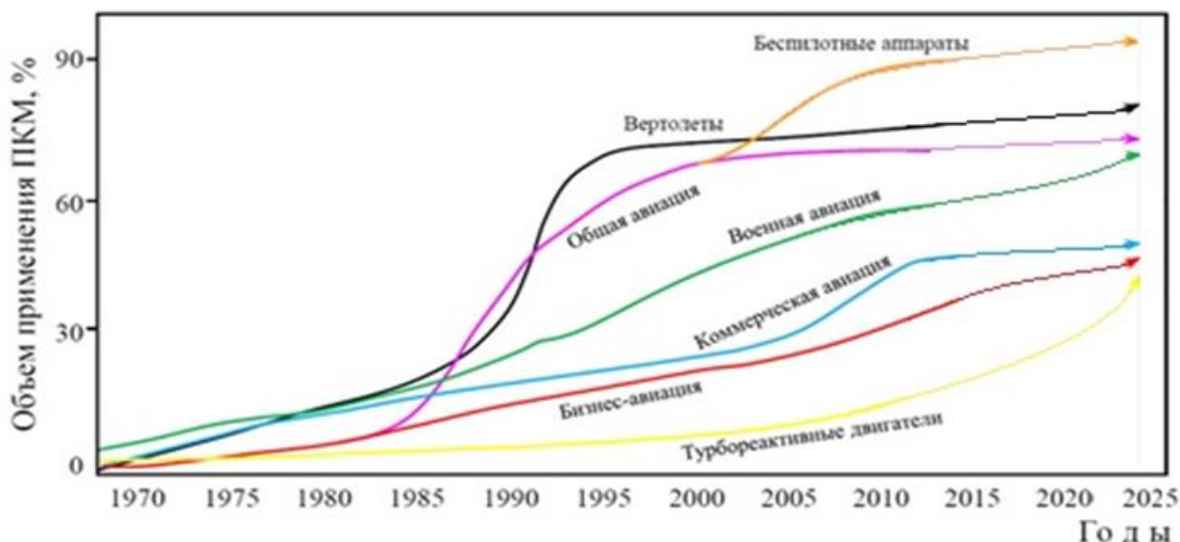


Рисунок 1 – Использование композитов в современном авиационном строении

Одним из плюсов композиционных материалов является высокая удельная и усталостная прочность, а также повышенная износостойкость и жесткость. Ключевую роль играет матрица композита, обеспечивающая монолитность материала, его стойкость к внешним воздействиям, а также равномерное распределение и передачу напряжений. Армирующий элемент в составе композита служит для укрепления и обладает большей прочностью, чем матрица. Подбирая свойства матрицы и армирующего элемента в соответствии с текущими задачами, можно достичь необходимого сочетания технических и эксплуатационных характеристик [10].

Полимерные композиционные материалы на основе стекловолокна и углеродных волокон получили широкое применение в современной авиационной промышленности.

1.2. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стекловолоконистых наполнителей

Армированные композиты - это материалы с гетерогенной структурой, которые объединяют свойства полимерной матрицы и армирующего наполнителя, а также их внутреннюю структуру, границы раздела фаз и реакцию на воздействия извне. Благодаря разнообразию компонентов в материале (включая их природу, форму и размер), возможно значительно изменить свойства армированных композитов. Преимуществом является способность создания материалов с характеристиками, выходящими за рамки исходных компонентов [10].

Армирующий каркас из волокон наполнителя оказывает основное влияние на прочность композитного материала, в то время как полимерная матрица отвечает за перенос напряжений между волокнами и сохранение формы конструкции. Взаимодействие между поверхностью волокна и связующим, ориентация молекул их сорбцией определяют взаимодействие на границе фаз матрица-наполнитель в полимерном композите [11].

Углепластики выделяются своей высокой усталостной прочностью, превосходящей боро- и стеклопластики, приближаясь к уровню титана и сплавов сталей. Они превосходят металлы и сплавы по виброустойчивости и обладают высокой демпфирующей способностью. Углепластики отличаются радиационной, водостойкостью, аэроустойкостью и химической стойкостью и используются для производства высоконагруженных конструкций [12, 13]. Наиболее широкое применение в производстве силовых конструкций самолетов получили углепластики на основе эпоксидных связующих.

Препреги углепластиков ранее производили с помощью растворной технологии, включающей высокое содержание растворителя, чаще всего спирто-ацетоновой смеси. Однако этот подход имеет свои недостатки, так как отверждение растворных связующих приводит к выделению вредных летучих веществ, требующих удаления при формовке пластика [14]. Переход на

расплавные связующие позволяет избежать этих проблем и повысить точность содержания связующего в препреге.

Для создания высоконагруженных композиционных конструкций в авиации широко применяются углепластики на основе однонаправленных волокон. Их использование обеспечивает необходимую прочность и жесткость приложенной нагрузки в различных направлениях. Полимерные стекловолокниты, в свою очередь, характеризуются сочетанием высокой прочности, низкой плотности, теплоизоляцией, радиопрозрачностью и доступностью, что делает их идеальными для легких конструкций [15].

При разработке полимерных композитов важно учитывать свойства наполнителя и связующего, а также их взаимодействие. Разнообразие современных наполнителей (углеродных, стеклянных) позволяет создавать материалы с новыми свойствами [16]. Поэтому важно изучить номенклатуру и особенности наполнителей для полимерных композитных материалов.

1.3. Характеристика наполнителей для ПКМ

Индустриальная революция в XIX веке инициировала процесс динамичного развития производства разнообразных стекловолокнистых материалов (стеклянные нити, минеральная вата) и менее динамичного - углеродно-волоконных материалов (углеродное волокно). Однако вплоть до начала XX века, ввиду промышленных и технологических ограничений, процесс изготовления тонких и гибких стекловолокнистых материалов, в сравнении с современными технологиями, являлся труднодоступным [17].

Первое стекловолокно, которое используется и по сей день, было создано Дейлом Клейстом, молодым исследователем из компании Corning Glass (США). В 1936 году Corning Glass в соавторстве с Owens-Illinois - другой компанией, занимавшейся исследованиями в области изготовления стекловолокна, запатентовали продукт под названием Fiberglass. В 1938 году обе фирмы объединились под одним брендом Owens-Corning, который существует по сей день [18]. Промышленное производство стекловолокна было запущено еще в 40-е

годы прошлого века, однако по своим качественным характеристикам оно не соответствовало требованиям для специальных целей.

В связи с динамичным развитием ракетной, атомной техники, и позже автомобилестроения, возникла необходимость применения новых полимерных композиционных материалов с повышенными теплопрочностными характеристиками и пониженной массой, в связи с чем возник особый интерес к наполнителям на основе органических, углеродных, борных, карбидокремниевых и других волокон с уникальными свойствами, а также широкому ассортименту полимерных связующих с разнообразными характеристиками и разработке промышленных способов изготовления полимерных композитов и изделий из них [19-21].

В материаловедении волокном называется протяженное, гибкое и прочное тело с небольшими поперечными размерами, которое подходит для создания пряжи и текстильных изделий. Волокна считаются сверхпрочными и высокомодульными, если они при растяжении обладают высокими значениями удельной прочности (более 1,3 ГПа) и модуля упругости (более 50 ГПа). Эти волокна позволяют создавать текстильные изделия и комбинированные материалы повышенной прочности с низким удельным весом (примерно 2 г/см³). Высокую прочность данных волокон обуславливает высокая организованность структуры [22].

Как правило, к высокомодульным высокопрочным относят волокна на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), поливинилспиртовые (ПВС), полипарафениленбензоксазольные (ПБО), арамидные, углеродные, стеклянные, базальтовые волокна.

Рассмотрим отдельно углеродные и стеклянные волокна, которые представляют наибольший интерес для использования в составе полимерных композиционных материалов авиационного назначения.

Главное достоинство углеродных и стекловолоконистых наполнителей заключается в сочетании высоких упруго-прочностных характеристик с малой плотностью. Помимо этого, армированные пластики дают возможность создавать

самые разнообразные и во многих случаях нетрадиционные конструкции [23]. Они успешно применяются в авиационно-космической технике, на транспорте, в строительстве, для изготовления спортивного инвентаря и для другого назначения.

1.3.1. Общая характеристика углеродных волокон

Карбоновое волокно, или по международным стандартам Carbon Fiber, представляет собой материал, сконструированный из ультратонких нитей с диаметром 6-8 мкм, главным образом, из атомов углерода; количество углерода в составе волокна варьируется от 92,0% до 99,9%. В структуре волокна атомы углерода объединены в кристаллические структуры малых размеров, расположенные параллельно друг другу [24].

Производство карбонового волокна базируется на термической обработке волокон из полиакрилонитрила (ПАН), которые не плавятся при термической обработке. Углеродное волокно обладает рядом уникальных свойств: значительной прочностью, долговечностью, широким диапазоном рабочих температур, что делает его выдающимся среди других материалов для армирования и вызывает повышенный интерес у исследователей, несмотря на его высокую стоимость среди других армировочных волокон. Карбоновые материалы обладают низкой плотностью (1,7 г/см³ по сравнению с 2,8 г/см³ у алюминия и 7,8 г/см³ у стали) и высокими значениями прочностных характеристик. Они также выдерживают воздействие жесткого биологического и химического воздействия, имеют низкую плотность, хорошие теплофизические и электроизоляционные свойства и входят в категорию материалов с высокой огнестойкостью [25].

Благодаря своим уникальным свойствам, полимерные композитные материалы на основе карбонового волокна обладают чрезвычайно высокими характеристиками – прочностью, устойчивостью к усталости, модулем упругости, химической, радиационной и коррозионной стойкостью, которые значительно превосходят аналогичные показатели для многих других материалов, включая

сталь и полимерные композитные материалы, использующие другие виды волокон, при гораздо меньшей массе [27, 28] (таблица 1).

Таблица 1 – Прочностные свойства волокнистых материалов

Тип волокна		Прочность при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, ГПа	Плотность, г/см ³
Углеродное (на основе ПАН-прекурсора)	Высокопрочное со стандартным модулем	3500-5000	200-280	1,75-1,80
	Высокопрочное среднемодульное	4500-7000	280-325	1,73-1,81
	Высокомодульное	3500-5000	325-400	1,75-1,85
	Сверхвысокомодульное	2500-4000	450-600	1,85-1,95
Стекло	Е-стекло	2500-3800	70-75	2,5-2,7
	S-стекло	4000-4500	80-90	2,5
Органическое	Арамидное	3000-3600	60-180	1,45
	Полиэтиленовое	200-3000	5-170	0,96
Стальное	Высокопрочное	1200-2800	200	7,8
	Нержавеющее	800-2000	190	7,8
Базальтовое		3000-4800	90-110	2,6-2,8
Борное		3500-4000	350-400	2,6

Однако не стоит забывать, что углеродные волокна имеют существенный недостаток в виде дефектов и пористости на поверхности, что может привести к потере прочности волокна при его обработке в текстильной промышленности и отразиться на качестве конечного продукта [28].

С начала существования Советского Союза углеродные волокнистые материалы были признаны стратегически важными, определяющими технологическую независимость и обороноспособность страны. Используя композиционные материалы с укреплением углеродными волокнами, были разработаны конструкционные элементы из полимерных композитных материалов, включенных в современные изделия гражданской и военной авиации, космической техники, ракетных систем и другой военной техники. Наличие современных технологий серийного производства этих материалов и их расширение в промышленности являются ключевыми показателями развития

научно-производственного потенциала любой страны и обеспечивают успешное суверенное развитие [29-32].

В таблице 2 указаны главные компании, производящие углеродные волокна по всему миру.

Таблица 2 – Мировые производители углеродного волокна

Производитель	Производственная площадка	Торговая марка	Область применения
Solvay (Cytec Engineered Materials)	Бельгия, США, Австралия	Thornel, ThermalGraph	Аэрокосмическая техника
Hexcel Corporation	США, Испания, Австрия, Китай, Франция, Бельгия	HexTow	
Mitsubishi Rayon Co. Ltd.	Япония, США	MRC	Спортивное снаряжение, аэрокосмическая техника
Nippon Graphite Fiber Corp.	Япония	Nippon	Спортивное снаряжение
SGL Group	Германии, США	Panox, Sigrafil	Спортивное снаряжение, автомобилестроение
TohoTenax (Teijin Limited)	Япония, Германия, США	Tenax, Piromex	Аэрокосмическая техника, спортивное снаряжение, автомобилестроение
Toray Industries (Zoltek)	Япония, США, Франция, Венгрия, Мексика	Toray, Pyron, Panex	
Formosa Plastics Group	Тайвань	Tairyfil	
UMATEX Group (НПК «Химпромминжиниринг», ООО «Аргон», ООО «ЗУКМ»)	Россия	UMT	

Потребление углеродного волокна в России составляет около 1–1,6 % от всемирного объема спроса, который в 2018 году составил 78,5 тысяч тонн, при этом производственная мощность составила 149,0 тонн в год. Отрасли, использующие композитные наполнители — оборонная, космическая и авиационная, а главными производственными игроками на рынке являются компании ООО «Алабуга-Волокно», ООО «Аргон», ООО «ЗУКМ». Детальное исследование отечественного рынка углеродных наполнителей представлено в статье [33].

Ранее использование наполнителей с углеродным волокном было характерно для космической и оборонной отраслей. Однако, благодаря сокращению стоимости таких материалов, углеродное волокно нашло применение в новых областях: гражданской авиации, судостроении, ветроэнергетике, автомобилестроении, производстве спортивного оборудования и потребительских товаров.

Углеродное волокно, известное также как углеволокно (УВ), представляет собой органический материал с наноструктурой, содержащий от 92% до 99,99% углерода с высокой прочностью. Для изготовления УВ используются технологии высоких температурных процессов без доступа кислорода (пиролиз) из полимерных волокон для получения высокого выхода углеродного остатка. Свойства этих материалов напрямую зависят от выбранной технологии и использованных исходных материалов: волокон из полиакрилонитрила (ПАН), мезофазного и обычного пека, вискозных нитей, гидроксипропилцеллюлозы, фенолоформальдегидной смолы и других. Получаемые свойства УВ могут быть различными: от имеющих повышенную выносливость до универсальных углеродных материалов, все зависит от вида прекурсора и производственных процессов. Наиболее распространены в мире углеволокна, полученные из полиакрилонитрильных волокон. Создание высокопрочных полиакрилонитрильных нитей привело к возникновению нитей с высокой деформацией до 2,5%. Нити из углеволокна проявляют линейно-эластичное деформирование до момента разрыва. Для улучшения связи с матрицей они подвергаются специальной поверхностной обработке, делая их более шероховатыми через процесс окисления, а замасливание обеспечивает связь нитей с матрицей. Следует отметить, что среди высокопрочных и высокомодульных нитей существует много разнообразных видов с различными прочностями и модулями упругости; разные компании используют свои обозначения для этих нитей. Углеродные волокна могут быть представлены в форме нитей или жгутов, состоящих из 1000, 3000, 6000, 10000 и более

элементарных непрерывных филаментов (соответственно 1К, 3К, 6К, 10К и т.д., где "К" обозначает тысячу элементарных волокон). [34-36].

Армирующие волокнистые наполнители представляют разнообразие текстильных структур на базе углеродных волокон. Путем комбинирования различных видов армирующих волокон и методов их распределения в композитных материалах можно достигнуть состояния, где основные механические нагрузки совпадают с направлением волокон. Особенности распределения волокон имеют свою специфику, несущую трансверсальные и сдвиговые напряжения, что негативно влияет на адгезию между материалом и волокнами [25]. Важно, чтобы эти напряжения не превышали адгезионную прочность, так как это может вызвать локальные повреждения и ухудшение свойств композита. Армирующие наполнители условно подразделяются на виды в зависимости от ориентации структурных элементов (волокон, нитей):

- материалы с произвольным размещением частиц (нетканые материалы из рубленого волокна и непрерывных волокон) [25];
- однонаправленные структуры, включающие в себя армирующее волокно и материалы, которые сохраняют форму текстильного материала. Волокна укладываются параллельно и ориентированы в одном направлении [37];
- плоские структуры, где армирующие волокна распределены в двух или нескольких направлениях и ориентированы под углами. Объем текстильного материала может быть зафиксирован с помощью взаимного переплетения разных слоев армирующих волокон (тканые и плетеные структуры) или специальных нитяных систем (трикотажные структуры). Такие материалы широко применяются для создания армирующих полимерных материалов [38, 39];
- трехмерные структуры, где армирующие волокна присутствуют вдоль оси Z. Такие армирующие материалы являются сложными в производстве, но обладают высокой степенью стабильности и нечувствительностью к деформации. Они активно используются в ракетной и авиационной индустрии [40,41].

1.3.2. Общая характеристика стеклянных волокон

Использование стеклянных волокон в роли армирующих наполнителей обеспечивает сочетание высокой механической прочности, теплостойкости, химической устойчивости и стабильности диэлектрических свойств композитных материалов на основе стекловолокна [42]. Несмотря на то, что стеклянные волокна уступают другим видам волокон по некоторым характеристикам, низкая их стоимость привела к тому, что стеклянные волокна превзошли по объему потребления все остальные виды волокнистых наполнителей.

В зависимости от назначения, стеклянные волокна можно разделить на две основные категории: доступные волокна общего назначения и более специализированные материалы. Приблизительно 9 из 10 производимых в мире стекловолокон относятся к группе материалов общего назначения. Специализированные волокна составляют примерно 10%. Многие марки стекловолокон были названы в соответствии со своими характеристиками, таким образом:

- E (electrical) – с малым уровнем электрической проводимости;
- S (strength) – обладающие высокой прочностью;
- C (chemical) – устойчивые к химическим воздействиям;
- M (modulus) – с высоким модулем упругости;
- A (alkali) – содержащие большое число основных элементов, например, стекло типа «Витроцем»;
- D (dielectric) – с низкими показателями электрической проницаемости;
- AR (alkali resistant) – устойчивые к воздействию щелочей.

В ряде работ [43-45] рассматривается процесс создания и характеристики всех возможных марок стеклянных наполнителей.

Как правило для судостроительных композитов используются марки стекловолокна, не содержащие щелочных металлов. В случае менее требовательных композитов допускается применять стекловолокно, содержащее щелочные металлы. Стекловолокно марки ВМП характеризуется высокими

показателями прочности и модуля упругости в данной группе материалов. Продукция марки ВМП находится на одном уровне с углеродным волокном по прочностным показателям.

Основные свойства стекловолокна зависят от технологии изготовления, химсостава, температурных условий и условий эксплуатации. Максимальную надежность демонстрируют стекловолокна из бесщелочного и кварцевого магнийалюмосиликатного стекла. Высокое содержание щелочных металлов в исходном стекле существенно уменьшает надежность стекловолокна. Стекловолокно представляет собой трехмерный неорганический полимер с сетчатой структурой и химическими связями Si–O. Оно используется для изоляции от электричества, шума, тепла и армирования полимерных материалов.

Среди всех прочных материалов стекловолокно является самым популярным и занимает около 80% рынка армирующих материалов благодаря своей относительно невысокой стоимости. В России производится примерно 50 000 тонн данного материала ежегодно. Стекловолокно не горит, не подвержено коррозии, химически стойко и может эксплуатироваться в диапазоне температур от -200 до +550 °С. Таблица 3 содержит информацию о ведущих компаниях-производителях стеклянных наполнителей.

Таблица 3 – Мировые производители стеклянных наполнителей

Фирма - производитель	Производственная площадка	Торговая марка	Область применения
Crowning AGY	США	AGY	Аэрокосмическая техника, электроника
Jushi Group Co. Ltd	Китай	Jushi	
Saint-Gobain Performance Plastics Corporation	Тайвань	Vetrotex	
Valutex Reinforcements	США	Valutex	
SAERTEX GmbH & Co.KG	Германия	Saertex	Ветроэнергетика, автомобильный транспорт
Полоцк-Стекловолокно ПСВ	Беларусь	ПСВ	Строительные материалы, транспорт
Senagat Tehnologiyalary	Туркменистан	Senagat	
Юматекс	Россия	UMT	

В течение 2021 года было произведено около 130 000 тонн стекловолокна в разнообразных вариантах. В 2022 году объем производства продукции из стекловолокна сократился на 12–24% в зависимости от источника информации. Общее количество стеклянной продукции в России не позволяет осуществлять экспорт за рубеж, однако удовлетворяет внутренний спрос. Крупнейшими производителями стеклоткани являются компании: "ОС Стекловолокно", ООО "НПО Стеклопластик", "Стеклонит", "П-Д Татнефть – Алабуга Стекловолокно", ПАО "Астраханское стекловолокно", ООО "Ступинский завод стеклопластиков", ПАО "Новгородский завод стекловолокна", ООО "Махачкалинский завод стекловолокна" и "Завод стекловолокна".

Производство стеклянной ткани аналогично созданию других типов тканей путем переплетения нитей основы и утка. Организация и свойства ткани зависят от порядка чередования нитей различных систем. Существуют разные формы переплетений стеклянных тканей, включая: однонаправленное, полотняное, саржевое и восьмиремизное сатиновое переплетения. У каждого типа переплетения есть уникальные характеристики, влияющие на свойства ткани и область ее применения. В ряде работ [46, 47] представлено исследование, которое охватывает основные разновидности стеклянных тканей, их структуру, а также применяемые смазочные вещества и обработочные средства при изготовлении стеклопластиков конструкционного назначения.

1.4. Основные типы связующих для ПКМ

Физические свойства композитов из полимеров, усиленных армированием, в значительной степени зависят от характеристик использованного наполнителя - волокон. Однако характеристики полимерной матрицы имеют решающее влияние на эксплуатационные качества материала. Именно матрица выполняет функцию объединения волокон, что формирует цельный конструкционный материал [48].

В зависимости от типа связующего в составе композита, полимерные композитные материалы делят на две основные категории: с термопластичными и термореактивными связующими. Для авиационной промышленности ПКМ с

термопластичными связующими используются для создания частей интерьера, внутренних воздухопроводов и других несущественных элементов внутренних конструкций. Преимуществом данных материалов являются легкость в обработке, высокая ударная прочность и устойчивость к трещинам. Полимерные композитные материалы с термореактивными связующими применяются в авиации для производства ответственных конструктивных частей самолетов (например, детали крыла, фюзеляжа, лопатки турбин и т. д.) [49]. Среди преимуществ таких материалов следует отметить высокую механическую прочность и термостойкость. На данный момент активно разрабатывается область применения гибридных связующих веществ, которые объединяют в себе термопластичные и термореактивные составляющие [50], что способствует совмещению преимуществ обеих основных групп связующих. Полимерные составляющие композитных материалов, которые были разработаны ВИАМ, включают в себя весь спектр существующих и разрабатываемых видов композитных веществ.

Связующие, применяемые в авиастроении, включают автоклавное формование, вакуумное формование препрегов, процесс пропитки под давлением, вакуумно-инфузионный метод и пропитку через пленочное вещество [51-53].

Полимерные связующие в качестве основы содержат эпоксидные, кремнийорганические, фенольные, поликарбосилановые, цианэфирные, тетранитрильные и другие соединения [54]. Применение разнообразных химических соединений в качестве основы композиционных материалов дает возможность изготавливать продукцию для широкого спектра целей – от радиотехнических материалов до элементов силовых конструкций и интерьера на воздушных судах. В исследовании [49] подробно изложены свойства, характеристики и области применения различных видов связующих для этих целей.

В настоящее время наиболее востребованными остаются эпоксидные связующие. Их применяют для получения всех видов полимерных композитных

материалов - стеклопластика, углепластика, органопластика и гибридных материалов [55, 56]. Эпоксидные связующие характеризуются высокой адгезией и прочностью, отсутствием объемного усадки в процессе отверждения, улучшенной устойчивостью к усталости, способностью сопротивляться циклическим нагрузкам и образованию микротрещин, стойкостью к воздействию влаги и другим факторам.

Представляет интерес более подробно рассмотреть клеящие материалы авиационного назначения на основе эпоксидных олигомеров.

1.5. Клеящие материалы авиационного назначения на основе эпоксидных олигомеров

По результатам теоретического и практического исследования прочностных и вязкоупругих свойств полимерных композиций специалисты ВИАМа впервые в России разработали высокопрочные и высокоэластичные эпоксидные пленочные клеи для конструкций. Среди них популярны клеи марок ВК-31, ВК-36, ВК-41, ВК-46Б, ВК-51 и их модификации, широко используемые в авиации [57-59].

Эпоксидные пленочные клеи применяются для создания слоистых и сотовых силовых конструкций из металлов и полимеров [60-63]. Они отличаются высокой прочностью, стойкостью к воздействию вибрации, трещинам, климатическим условиям и агрессивным средам. Например, клей ВК-46Б применяется для склеивания сотовых конструкций, имеющих повышенную устойчивость к воздействию огня. Такие клейкие составы также используются в качестве основы для клеевых препрегов полимерных композитных материалов с улучшенными свойствами.

Эпоксидные пленочные клеи заменили фенолокаучуковые клеи, что способствовало появлению инновационных технологий склеивания с сотовыми конструкциями [64, 65]. Эти клеи обладают следующими преимуществами:

- не требуют перфорации сотового заполнителя в процессе изготовления сотовой конструкции;

- снижают массу сотовой конструкции на 2-2,5 раза за счет отсутствия подслоя фенолокаучукового клея под пленочный клей;
- обеспечивают более высокие прочностные характеристики клеевых соединений по сравнению с фенолокаучуковыми аналогами;
- при склеивании элементов сотовой конструкции клеи термоусаживаются на торцах сот, что увеличивает площадь склейки и прочность соединений.

Эпоксидные пленочные клеи для конструкций получили широкое распространение благодаря своей способности создавать новые полимерные композитные материалы с инновационными характеристиками. При изготовлении клеевых препрегов используются различные наполнители, такие как углеродные жгуты и стекловолокно, для регулирования свойств материалов в широком диапазоне. Главным отличием клеевых связующих от традиционных является их клеящая способность.

Свойства клеевых связующих [66, 67] характеризуются прочностными характеристиками клеевых соединений, которые представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Свойства клеевых связующих марок ВСК-14

Марка связующего	Прочность при сдвиге, МПа, (не менее) при температуре, °С					Температура отверждения, °С
	20	80	120	150	170	
ВСК-14-1	19,6	19,6	-	-	-	125
ВСК-14-1с	19,6	19,6	-	-	-	140
ВСК-14-2	34,4	-	-	17,6	-	175
ВСК-14-2м	19,6	-	-	19,6	-	175
ВСК-14-2мр	20,0	-	20,0	-	-	175
ВСК-14-3	14,7	-	-	14,7	-	175
ВСК-14-4	17,6	-	-	-	17,6	175
ВСК-14-4м	17,6	-	-	-	17,6	155
ВСК-14-5м	17,6	-	-	17,6	-	150
ВСК-14-6	24,0	17,0	-	-	-	135

Клеевые связующие имеют однородную пластичную консистенцию по своему внешнему виду. Они характеризуются низким содержанием летучих веществ, которое не превышает 2,0 % (по весу). Один из таких материалов, клеевое связующее ВСК-14-6, после отверждения обладает самозатухающим

свойством [68].

Клеевые связующие обладают рядом преимуществ перед альтернативными связующими в силу их способности формировать пленку. Используя такие вещества, можно получить препреги стабильного качества, содержащие в себе как вязкоупругие характеристики традиционных связующих, так и адгезионные свойства, характерные для клеев. Это позволяет отказаться от применения пленочного клея при создании конструкций, включая сотовые.

Клеевые препреги предлагают возможность собирать клееные сотовые (или слоистые) конструкции из разнообразных неметаллических материалов за один рабочий цикл. Эта методика также способствует созданию сложных сотовых и композитных конструкций, объединяющих сотовые и монолитные элементы, которые могут быть изготовлены посредством автоклавного формования или прямого прессования в зависимости от требований к изделию [69].

Использование клеевых препрегов [70] приводит к сокращению времени изготовления конструкций, уменьшению трудозатрат на производство сотовых структур, снижению веса конструкций (особенно с использованием сотовых наполнителей), сокращению необходимого инструмента и снижению выбросов вредных веществ в окружающую среду благодаря использованию экологически безопасной технологии производства клеевых препрегов. Композитные материалы, основанные на клеях, отличаются высокой герметичностью (в 10 раз выше), повышенной устойчивостью к трещинам (на 40-50 %) и улучшенной прочностью при сдвиге между слоями (на 20-35 %) по сравнению с материалами, на основе связующих содержащих растворители. Они также обладают улучшенными характеристиками усталости, долговечностью и сохранением высокой прочности после воздействия различных факторов окружающей среды. Процессы, связанные с использованием клеевых препрегов в промышленном производстве, характеризуются высокой степенью повторяемости и минимальным количеством контрольных действий [35].

На рисунке 2 иллюстрируется сравнение технологий создания сотовых конструкций с использованием клеювого препрега и стандартной методики с применением заранее изготовленных обшивок и пленочного клея.

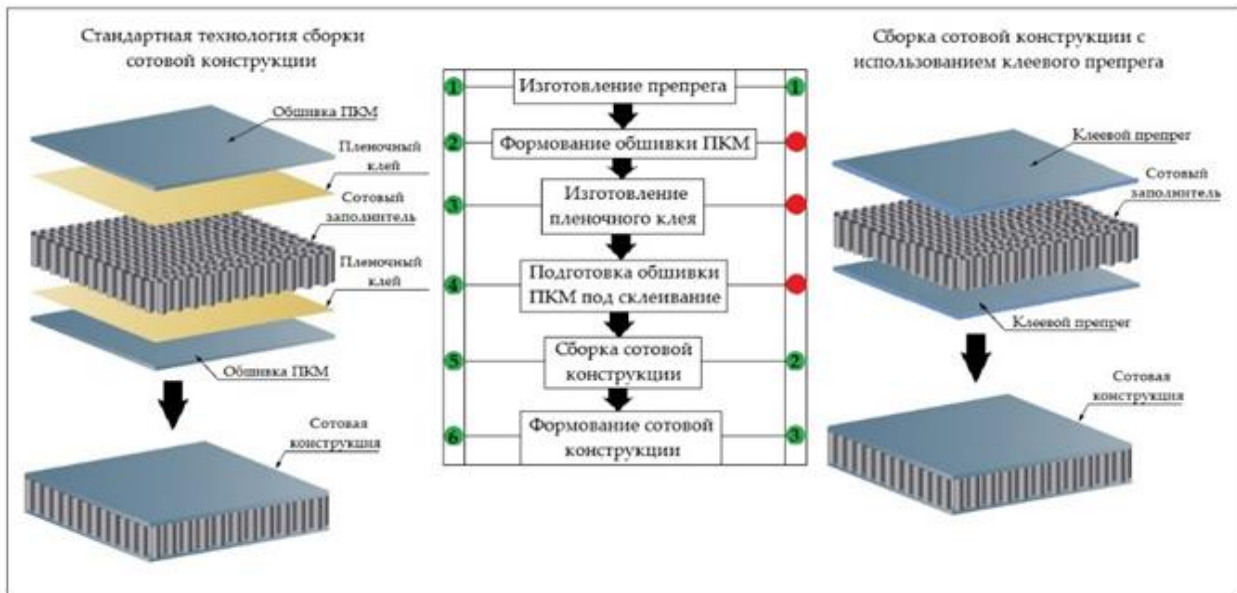


Рисунок 2 – Основные операции технологического процесса изготовления сотовой конструкции

При применении клеювого препрега исключаются некоторые этапы работы, такие как подготовка и формовка обшивки, подготовка поверхности перед склеиванием, а также изготовление и применение клея. Кроме этого, следует отметить, что использование клеювых препрегов упрощает создание деталей клиновидной формы, в том числе сложной кривизны, потому что не отвержденный препрег легко принимает любую форму. Это исключает сложные и затратные процессы подгонки склеиваемых поверхностей. Можно изготовить детали, объединяющие в себе сотовые и слоистые элементы, за одну операцию [71].

Изучение полимерных композитных материалов на основе клеювых препрегов началось в девяностых годах прошлого века. Первоначально были разработаны материалы на основе клеювых препрегов КМКС-1.80 и КМКУ-1.80, пригодных для использования при температуре 80 °С [72].

Сравнение свойств композитных материалов на клеевых препрегах с термостойкостью 80 °С марки КМКУ, созданных на основе углеродной ленты ЭЛУР-П-А, и марки КМКС, изготовленных из стеклоткани Т-10-14 при температуре 20 °С, представлено в таблице 5.

Таблица 5 – Сравнительные характеристики полимерных композитных материалов, изготовленных из клеевых препрегов с использованием углеродного и стеклянного наполнителя

Свойства	Значение свойств для ПКМ на основе клеевых препрегов марок	
	КМКС-1.80.Т10	КМКУ-1.80.Э0,1
Диапазон рабочих температур, °С	-60÷+80	
Плотность, г/см ³	1,8	1,43
Предел прочности при растяжении, МПа:		
по основе	620	830
по утку	335	44
Модуль упругости при растяжении, ГПа:		
по основе	22	100
по утку	17	9,0
Предел прочности при сжатии, МПа:		
по основе	520	890
по утку	-	180
Предел прочности при статическом изгибе, МПа:		
по основе	785	1130
по утку	550	-
Предел прочности при межслоевом сдвиге, МПа	75	83

Применение различных клеевых связующих с отличающимся составом и характеристиками в сочетании с разнообразными наполнителями из стекла и углеродного волокна позволило расширить ассортимент ПКМ, произведенных из клеевых препрегов. Были разработаны следующие марки препрегов: КМКС-2м.120 и КМКУ-2м.120 с рабочей температурой 120 °С, КМКУ-3м.150 с рабочей температурой 150 °С, КМКС-4.175, КМКС-4м.175, КМКС-4к.175 с рабочей температурой 175 °С. Однако композитные материалы, разработанные на основе клеевых термореактивных связующих под общей маркой ВСК-14,

являются горючими, и поэтому не могут быть использованы в интерьерах воздушных судов и других транспортных средствах.

Таким образом, представляет интерес рассмотреть более подробно требования, которым должны отвечать полимерные композиционные материалы для применения в конструкции интерьеров пассажирских самолетов и определить пути снижения их горючести.

1.6. Пути снижения пожароопасности полимерных композиционных материалов

Требования к материалам, используемым в отделке воздушных судов и других видов транспорта, строго регулируются с учетом пожарной безопасности. В настоящее время особое внимание уделяется замене металлических материалов на полимерные композиционные материалы (ПКМ) в конструкции авиационного оборудования, что позволяет сократить вес, но при этом представляет опасность возгорания [73, 74].

Полимерные композиты, применяемые в отделке салонов пассажирских самолетов, должны соответствовать нормам безопасности воздушных судов в соответствии с правилами АП-25 для гражданских самолетов транспортной категории [75].

Возникают трудности в разработке негорючих полимерных композитов из-за различных требований к теплостойкости и огнестойкости в зависимости от области применения и разнообразных критериев пожаробезопасности, таких как уровень кислородного индекса, способность пламени распространяться, количество выделяющегося тепла при горении, степень дымообразования, плотность дыма, токсичность продуктов сгорания. Комбинация этих параметров достигается путем тщательного подбора составляющих, включая добавки, и оптимального их сочетания в связывающем материале. Помимо результатов лабораторных испытаний на пожаробезопасность, принимаются во внимание технологические особенности преобразования предварительно пропитанных

материалов в изделия, а также условия эксплуатации каждого отдельного изделия [76].

Добавление минеральных наполнителей или специальных огнегасящих добавок (антипиренов) в состав связующего материала – один из способов уменьшения пожароопасности полимерных композитов, а также изменение химической структуры олигомеров, используемых как компоненты связующих материалов [77-79].

Каждый из этих методов имеет свои плюсы и минусы. Например, добавление антипиренов является более простым и распространенным подходом, однако при нагревании некоторые добавки могут испаряться, а также приводить к ухудшению прочностных характеристик модифицированных связующих. Химическое модифицирование негорючих эпоксидных олигомеров с галогенсодержащими элементами позволяет получить продукты с более эффективным огнезащитным эффектом, чем для инертных компонентов, которые не вступают в реакцию при отверждении полимерного материала [80].

Для создания более пожаробезопасных материалов могут применяться различные химические вещества в качестве антипиренов, такие как органические соединения с содержанием хлора и брома, соединения сурьмы, бораты цинка, карбонаты, гидроксиды алюминия и магния, фосфорсодержащие соединения, и другие. Наиболее часто используются соединения с атомами галогена, которые блокируют свободные радикалы, образующиеся при горении, и тормозят ход горения. Эффективность антипиренов на основе брома превышает эффективность хлорсодержащих соединений [81-85].

В процессе нагревания и разложения полимера атомы галогенов переходят в газовую фазу, изменяя процессы реакции горения – взаимодействия горючих компонентов с кислородом воздуха. Это приводит к снижению температуры пламени, снижению полноты сгорания и увеличению образования не полностью сгоревших продуктов. Влияние бромсодержащих антипиренов на характеристики пожарной опасности различных материалов рассмотрено в работах [86-88] и приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Влияние бромсодержащих антипиренов на характеристики пожарной опасности

Материал	Горючесть ¹ , с	Дымообразующая способность ²		Кислородный индекс ³ , %
		Д ₄	Д _{max}	
Стеклопластик на основе эпоксидного связующего, толщина 2 мм	180	173	179	19
Стеклопластик на основе эпоксидного бромсодержащего связующего, толщина 2 мм	2	369	369	27

1 – По ОСТ 1 90093, Авиационные правила АП-25, Приложение F, Часть I – продолжительность самостоятельного горения.
2 – ГОСТ 24632. Д₄- оптическая плотность дыма через 4 мин испытания;
Д_{max} – максимальная оптическая плотность дыма.
3 – ГОСТ 21793

Как видно из таблицы 6, введение в состав эпоксидного связующего бромсодержащего олигомера существенным образом снижает горючесть и повышает кислородный индекс.

В работе [89] сказано, что при выборе антипиренов важно учитывать температуру деструкции антипирена, которая должна быть ниже или совпадать с температурой деструкции основного полимера, в противном случае антипирен при попадании в зону пламени не оказывает влияния на процесс горения.

1.7. Типы конструкций из ПКМ и технологии их изготовления

ПКМ пользуются повышенным спросом в качестве материалов для использования в конструкциях изделий гражданской и военной авиационной техники средней и высокой степени нагрузки. Например, углепластик и стеклопластик активно используются для создания цельных и встроенных элементов фюзеляжа, крыльевых панелей, хвостовых частей, рулей и высоты [90]. ПКМ также широко используются для производства трёхслойных сотовых конструкций современных самолетов [91] (например, носовые радиопрозрачные антенные обтекатели, обтекатели приводов элеронов, рули направления, стабилизаторы, панели пола).

Одной из проблем при работе с полимерными композитными материалами в процессе сборки конструкций, например трёхслойных сотовых конструкций, является недостаточная надёжность их механических свойств по сравнению с классическими металлическими материалами.

Исследование возможностей обеспечения низкого веса структурных элементов воздушного транспорта играет значительную роль в прогрессе современной авиационной отрасли. Потенциальное использование композитных материалов на основе полимеров в сборке современных пассажирских самолётов представлено панелями пола, которые занимают существенную площадь внутри авиалайнеров: в дальнемагистральных воздушных судах, вмещающих более 200 пассажиров, площадь данных элементов превышает 100 квадратных метров; в среднемагистральных, вмещающих от 24 до 80 пассажиров – от 14 до 45 квадратных метров. Вес панелей пола у одного самолёта может колебаться от 250 до 500 килограмм [92].

ПКМ позволяет существенным образом снизить вес изделия с сохранением высокой прочности и увеличить ресурс конструкций изготовленных из них за счет высокой жесткости, вибро- и теплостойкости, влагостойкости и т.д. Применение конструкционных материалов, обладающих высокой прочностью и жёсткостью способствует повышению эффективности использования панелей на борту воздушных судов [93]. Это позволяет увеличить весовой запас для расширения дальности полёта, повышения грузоподъемности и сокращения расхода топлива. Применение композитных материалов в покрытиях пола воздушных судов значительно повышает их стойкость, сохраняя при этом прочность и жёсткость.

Обычно [94] покрытие пола имеет вид трёхслойных сотовых конструкции с относительно тонкими несущими слоями (обшивкой) и более массивным наполнителем внутри. В давних моделях изделий (Ту-144, Ту-154, Ил-18) использовались панели пола, составленные из трёхслойных материалов: фанеры, алюминия, стеклопластика и наполнителей в виде алюминиевых сот или пенопласта. Вес 1 м² панелей пола из указанных материалов в кабине самолёта

колебался от 4,5 до 5,6 кг в зависимости от расположения. С помощью ПКМ возможно значительно уменьшить вес покрытия пола [95, 96]. На воздушных судах серии Ил-96 для покрытия пола используются КАСТ-В для верхнего слоя, КМУ-3 с низким содержанием горючих элементов для нижнего слоя и сотовый материал ПСП-1 в качестве наполнителя, соединенные с обшивками специальным клеем. Эти материалы способствуют уменьшению веса одного квадратного метра покрытия настила от 3,4 до 3,8 килограмма, в зависимости от их расположения. Вес покрытия настила для изделия Ил-114, состоящего из трёхслойной сотовой конструкции с обшивками из стеклоткани на основе эпоксидного связующего и полимерного наполнителя, колеблется от 2,8 до 3,6 килограмма, в зависимости от расположения. На борту изделия Ту-204 используются панели пола, состоящие из высокопрочных стеклопластиков и специального наполнителя из полимерного материала. Это позволяет достичь веса панели в интервале от 2,5 до 5,2 килограмма за квадратный метр в зависимости от конкретного расположения панели [97, 98].

Одним из ключевых условий для материалов, которые применяются при создании панелей пола ПКМ, является требование к использованию низкогорючих элементов [99, 100].

Выводы по литературному обзору

По результатам анализа литературного обзора установлено, что в настоящее время при изготовлении сотовых конструкций на основе ПКМ применительно к изготовлению панелей пола самолетов, как отечественных так и зарубежных, используется традиционная многоступенчатая технология сборки с применением пленочного клея для склеивания предварительно отформованной обшивки с сотовым наполнителем, ведущая к увеличению массы и трудоемкости изготовления. Также было отмечена эффективность применения для изготовления сотовых конструкций клеевых препрегов на угле- и стеклонаполнителях. Номенклатура клеевых препрегов постоянно расширяется. В то же время в

составе этих материалов по-прежнему используются уже разработанные ранее клеевые связующие марки ВСК-14, которые являются горючими материалами.

Ввиду существенного объема, занимаемого сотовыми конструкциями, в том числе панелями пола, во внутренней части самолета, а также ввиду наличия требований авиационных правил АП-25 по ограничению горючести конструкций панелей пола, в настоящее время существует необходимость в разработке составов и технологий изготовления полимерных композиционных материалов пониженной горючести на основе клеевых препрегов марок КМКУ и КМКС с теплостойкостью 80 °С, с уровнем технологических свойств и прочностных характеристик на уровне или превышающих зарубежные аналоги и соответствующих требованиям АП-25 Приложение F часть I.

Также представляет научный и практический интерес разработка технологий изготовления различных элементов конструкций самолета из ПКМ с использованием полимерных композиционных материалов с пониженной горючестью, в том числе толстостенных конструкций или панелей пола сотовой конструкции, что будет способствовать расширению объемов использования этих перспективных материалов.

Глава 2. Объекты и методы исследования

2.1. Объекты исследований

Для разработки состава угле- и стеклопрепегов для ПКМ пониженной горючести обладающих теплостойкостью 80°C, применимых для изготовления слоистых и сотовых конструкций, в том числе конструкций панелей пола, соответствующих нормам авиационных правил по пожарной безопасности АП-25, в качестве полимерной основы были рассмотрены клеевые связующие, обладающие теплостойкостью 80 С: клеевое связующее марки ВСК-14-6 (ТУ 1-595-14-1423-2014) и клеевое связующее марки ВСК-14-1 (ТУ 1-595-14-1034-2008), основные свойства которых представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Основные свойства эпоксидных клеевых связующих для исследования в составе разрабатываемых композиционных материалов

Наименование характеристики	Значение показателя для связующего марки	
	ВСК-14-1	ВСК-14-6
Предел прочности при сдвиге клеевых соединений алюминиевого сплава Д16АТ или Д19АТ, МПа, не менее, при температуре, °С		
20	19,6	24,0
80	19,6	17,0

Для разработки состава клеевого препрега углепластика были выбраны углеродные армирующие наполнители, представленные в таблице 8, как наиболее перспективные на момент проведения исследований.

Таблица 8 – Углеродные армирующие наполнители для исследования в составе разрабатываемого композиционного материала.

Наименование наполнителя	Нормативная документация
Лента углеродная однонаправленная Ст-11088	ТУ 1916-026-90160486
Нить (жгут) углеродный УВ-12К	ТУ 1-595-11-1407-2013

Для разработки состава клеевого препрега стеклопластика были выбраны стеклянные армирующие наполнители, представленные в таблице 9, наиболее широко применяемые в промышленности и отвечающие современным техническим требованиям по уровню прочностных характеристик.

Таблица 9 – Стеклянные армирующие наполнители для исследования в составе разрабатываемого КМК

Наименование наполнителя	Нормативная документация
Стеклоткань конструкционная Т-10-14	ГОСТ 19170-2001
Ткань стеклянная конструкционная Т-60/2(ВМП)-14	ТУ 6-48-05786904-111-92

2.2. Методы исследований

2.2.1. Термический анализ

Исследование реологии связующих включало использование метода динамической реологии для определения их динамических характеристик при динамической нагрузке. Термический анализ был применен для изучения процесса отверждения связующего, точки стеклования и энергии активации механического разрушения. Эти исследования проводились с применением методов ДМА и ДСК.

Динамическое нагружение

Исследования по изучению реологических характеристик проводились в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р 57950-2017. Эксперименты проводились в режиме управляемого напряжения 2 Па при постоянной частоте 1,6 Гц с помощью рабочего инструмента, состоящего из двух плит диаметром 50 мм и зазором 0,6 мм. Образец клеевой композиции нагревали со скоростью, не превышающей 4 К/мин, до необходимой температуры и выдерживали 10 минут для установления термического равновесия.

Динамический механический анализ

Для изучения температуры стеклования углепластиков был применен метод термомеханического анализа. Эксперименты были проведены в соответствии с инструкцией, описанной в стандарте СТО 1-595-36-464-2015.

Температуру стеклования углепластиков и стеклопластиков определяли при воздействии статической изгибающей нагрузки, создающей напряжение 20 МПа. Испытания проводили при нагревании с постоянной скоростью 5 К/мин. Метод основан на определении температурной зависимости деформации образца под воздействием постоянной нагрузки. За температуру стеклования принимается значение температуры, соответствующее началу скачкообразной деформации при переходе образца из стеклообразного в высокоэластическое состояние.

Термогравиметрический анализ

Исследование термической стойкости проводили по ГОСТ Р 56721-2015. Метод основан на регистрации изменения массы образца под воздействием постоянной или изменяющейся во времени температуры с постоянной скоростью. Исследования проводили при температуре, изменяющейся во времени со скоростью 10 К/мин, на воздухе. Исследование термоокислительной стабильности углеродного жгутового наполнителя проводили с применением термоаналитического комплекса с модулем ТГА.

Дифференциальная сканирующая калориметрия

Исследование полимеризации клеевых составов проводилось при различных скоростях нагрева (5, 10 и 20 К/мин) в пределах от 25 до 280 °С с использованием дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Этот метод, являющийся самым точным, пригоден для изучения полимеризации термореактивных клеевых материалов, включающих эпоксидные смолы. Эти процессы сопровождаются четким и легко воспроизводимым экзотермическим тепловым эффектом, аналогичным проведенному в данном исследовании. Эксперименты проводились в атмосфере воздуха в алюминиевых тиглях с

отверстиями объемом 40 мкм. Полученные данные анализировались в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р 56755-2015.

2.2.2. Микроструктурные исследования

Растровая электронная микроскопия

Проведение анализа микроструктуры композитов углеродного жгутового наполнителя и стеклонаполнителя было выполнено на растровом электронном микроскопе при рабочем напряжении 15 кВ и силе тока пучка 20 пА. Для изучения микроструктуры полимерных матриц были исследованы образцы угле- и стеклопластика, которые предварительно прошли обработку в плазме. Процесс ионно-плазменной обработки микрошлифов пластиков для изучения структуры материала был осуществлен при напряжении 500 В и токе 10 мА в течение 30 минут. Для уменьшения воздействия зарядов на поверхности микрошлифов был применен проводящий слой (покрытие золотом и палладием толщиной 5 нм) с использованием установки для магнетронного напыления.

2.2.3. Физико-механические испытания

Предел прочности при сжатии

Исследование прочности материалов, таких как углепластик и стеклопластик, на сжатие проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 33519-2015. В соответствии с данным стандартом для определения предела прочности материала при сжатии использовался образец в форме прямоугольной полосы и закреплялся специальной оснастке между захватами испытательной машины. Затем образец в оснастке подвергался нагружению с помощью испытательного оборудования, со скоростью перемещения траверсы 10 мм/мин.

Предел прочности при статическом изгибе

Прочность образцов ПКМ при статическом изгибе была определена согласно требованиям стандарта ГОСТ 56810-2015. Эксперимент представляет собой изгибание образца ПКМ с прямоугольным сечением, размещенного без

фиксации, с равномерным нагружением до момента разрушения или достижения предварительно заданного уровня прогиба. Исследования были проведены на испытательной машине, со скоростью перемещения траверсы 10 мм/мин.

Прочность при сдвиге клеевого соединения

Процесс определения максимального значения силы, необходимой для разрушения клеевого соединения при его сдвиге проводили по ГОСТ 14759-69 на образцах, полученных при склеивании внахлест пластинок, изготовленных из алюминиевого сплава Д16АТ по ГОСТ 21631 или Д19АТ по ОСТ 1 90070, предварительно протравленных по Пиклинг-методу или анодированных в хромовой кислоте по ПИ 1.2.296.

Прочность при равномерном отрыве

Предел прочности при равномерном отрыве обшивки от сотового заполнителя определяли по ОСТ 1 90069-72 на «грибках», изготовленных из прутков алюминиевого сплава Д16 по ГОСТ 21488 или Д19 по ОСТ 1 90395, с неперфорированным сотовым заполнителем с ячейкой 2,5 мм из фольги сплава Амг2Н толщиной от 0,03 до 0,05 мм по ОСТ 1 00728.

Разрушающая нагрузка при 3-х и 4-х точечном изгибе

Определение разрушающей нагрузки при изгибе выполнялось в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ Р 56791-2015 (для четырехточечного изгиба) и ГОСТ Р 56798-2015 (для трехточечного изгиба). Основная идея методики заключается в том, что образец, находящийся на двух опорах, подвергается изгибу до момента разрушения, вызванного смещением материала внутреннего слоя образца. Исследования были проведены на испытательной машине, со скоростью перемещения траверсы 10 мм/мин.

Прочность при сжатии трехслойной сотовой панели

Исследование прочности при сжатии трехслойной сотовой панели осуществляли в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р 56816-2015. Эксперимент проводился в условиях, когда внутренний слой данной конструкции

подвергался давлению, направленному вдоль оси, перпендикулярной к внешним слоям. Исследования были проведены на испытательной машине, со скоростью перемещения траверсы 10 мм/мин.

Расслаивание с намоткой на барабан

Для оценки устойчивости обшивки к отслаиванию от заполнителя использовали метод, изложенный в стандарте ГОСТ Р 56792-2015. Суть заключается в проведении испытания на расслаивание с намоткой на барабане под действием натяжения. При выполнении испытания образец "сэндвич"-конструкции прямоугольной формы с выступающими внешними слоями с двух сторон помещают в специальную сконструированную оснастку, расположенную между захватами оборудования, и подвергают его нагружению в виде продолжительного растяжения. Исследования были проведены на испытательной машине, со скоростью перемещения траверсы 10 мм/мин.

2.2.4. Определение характеристик пожаробезопасности

Горючесть

Горючесть углепластика и стеклопластика на соответствие требованиям АП-25 (Приложение F часть I) определяли по ГОСТ Р 57924-2017. Сущность метода состоит в воздействии малокалорийного источника воспламенения (пламя лабораторной газовой горелки) на нижнюю часть вертикально установленного образца в течение заданного времени, после чего оценивается способность образца к самостоятельному прекращению горения. Эта способность определяется по длине прогорания, времени остаточного (самостоятельного) горения после удаления источника воспламенения и по наличию и продолжительности горения падающих капель.

Дымообразование и токсичность

Дымообразование углепластика и стеклопластика на соответствие требованиям АП-25 (Приложение F часть V) определяли в соответствии с

ГОСТ 24632-81. Сущность метода испытаний заключается в воздействии в герметичной камере на вертикально установленный образец теплового потока заданной интенсивности (25 кВт/м^2) и пламени многорожковой газовой горелки (режим испытания «горение»), или только теплового потока (режим испытания «пиролиз» или «тление»). Через образующиеся парогазовые продукты термической деструкции и горения проходит световой луч заданной интенсивности, по степени ослабления которого судят об оптической плотности дыма в каждый текущий момент времени.

Исследование наличия и токсичности газов в процессе термического разложения полимерного композиционного материала проводилось в герметичной камере, как при горении, так и при пиролизе, с применением одноразовых газоанализаторных трубок.

2.2.5. Определение устойчивости к воздействию внешних факторов

Тепловлажностное старение

Исследование на тепловлажностное старение выполнено согласно ГОСТ Р 56762–2015 при помощи метода В. Основная идея которого состоит в том, чтобы провести ускоренные испытания материалов на стойкость к старению в условиях повышенной температуры и влажности при определенном времени экспозиции с последующим анализом изменений прочностных характеристик материала.

Стойкость к воздействию технических сред

Стойкость к воздействию бензина и масла образцов углепластика и стеклопластика проводили по ГОСТ 12020–72. Основная идея данного подхода заключается в осуществлении ускоренных тестов материалов на их устойчивость к воздействию различных жидких химических соединений и технических жидких сред в течение определенного временного интервала, установлении изменения прочностных свойств после экспозиции.

Тепловое старение

Старение образцов углепластика и стеклопластика исследовали в соответствии с ГОСТ 9.707–81. Основная задача данного подхода заключается в проведении быстрых тестов для оценки устойчивости материалов к воздействию температуры и влажности, определении изменений прочностных характеристик после воздействия.

Глава 3. Экспериментальная часть

3.1. Обоснование выбора связующего пониженной горючести

Возросший объем применения конструкционных неметаллических материалов в изделиях авиационной техники стимулировал разработку новых ПКМ с высокими требованиями по пожаробезопасности, в том числе создание высокопрочных ПКМ пониженной горючести. При разработке ПКМ с применением различных химических веществ в качестве замедлителей горения необходимо учитывать не только эффективность влияния этих веществ на снижение горючести полимерного материала, но их влияние на технологические, физико-механические свойства ПКМ, а также на стабильность этих свойств в процессе эксплуатации в условиях воздействия внешних факторов, в первую очередь климатических. Как указывалось ранее, на практике наиболее широкое распространение получили бром- и хлорсодержащие антипирены. Однако они приводят к значительному снижению прочностных характеристик полимерных материалов.

Из результатов изучения научно-технической и патентной документации можно выделить следующие тенденции развития объекта исследования:

- уменьшение горючести полимерных композитных материалов, применяемых в монолитных и трехслойных сотовых конструкциях панелей пола, достигается благодаря использованию совместных систем пламезащиты в составе связующих полимеров и огнестойких наполнителей;
- улучшение технологических характеристик возможно за счет производства высоконагруженных сотовых (слоистых) конструкций из неметаллических материалов с разной кривизной в одной операции;
- повышение экологической безопасности обеспечивается использованием расплавных связующих вместо традиционных, что сократит выброс вредных веществ в окружающую среду;

- снижение горючести при сохранении прочностных характеристик достигается за счет замены в составе полимерных композиций антипиренов на бромированные олигомеры.

В ВИАМ разработан новый класс материалов – связующих, характеризующихся пониженной горючестью. В этом классе материалов было разработано негорючее эпоксидное связующее марки ВСЭ-37, которое обладает самозатухающими свойствами и используется для создания элементов конструкций из ПКМ с использованием метода прессового формования. В процессе формования ПКМ это связующее отверждается в пределах температур от 140 до 180 °С и обладает оптимальными технологическими характеристиками. Исследование процесса изменения вязкости связующего при изотермической выдержке при температуре 70 °С показало, что время, в течение которого вязкость связующего остается на уровне до 30 Па·с, составляет от 25 до 220 минут, что определяет его жизнеспособность с точки зрения технологии при температуре переработки [77]. Однако значительный разброс значений технологической жизнеспособности, наблюдаемый для различных партий связующего ВСЭ-37, не позволяет отнести данное связующее к категории связующих с улучшенными технологическими свойствами.

Разработано эпоксидное связующее марки ВСЭ-39, не поддерживающее горение и предназначенное для изготовления электроизолирующих стяжек соединительных элементов линий электропередач по технологии полтрузии или RTM. Температура пропитки связующим составляет 60 – 70 °С, время гелеобразования при температуре 160 °С – от 45 до 110 мин, конечная температура формования ПКМ на основе связующего ВСЭ-39 составляет 170 °С [101].

Активно ведутся работы по созданию углепластиков на основе эпоксидных связующих. Разработан пожаробезопасный термопластичный углепластик марки ВКУ-43 на основе полифениленсульфона и равнопрочного тканого наполнителя полотняного переплетения – ленты-полотна. Материал может эксплуатироваться в интервале температур от минус 60 до плюс 160 °С.

Однако в сравнении с разработанным ассортиментом эпоксидных связующих, в том числе расплавного типа, наибольший интерес в последнее время вызывают клеевые связующие, которые в отличие от традиционных связующих обладают адгезионными свойствами и эффективно используются для изготовления клееных конструкций, в том числе трехслойных сотовых – клеевые связующие под общей маркой ВСК-14. Они представляют собой однородную пластичную массу; их характерной особенностью является низкое содержание летучих продуктов в процессе отверждения, которое не превышает 2% (по массе) [35].

Среди разработанных связующих ВСК-14 клеевое связующее марки ВСК-14-6 имеет существенное преимущество, так как оно является единственным клеевым связующим, которое обладает пониженной горючестью за счет содержания в своём составе бром- и хлорсодержащих эпоксидных смол, полигидроксиэфира и модифицированной бисмалеимидом эпоксидной смолы. Теплостойкость связующего марки ВСК-14-6 составляет 80 °С, что по теплостойкости соответствует связующему марки ВСК-14-1, которое в своём составе не содержит бромированных олигомеров, ПКМ на основе которого нашли широкое применение в изделиях авиационной отрасли [85].

На основании анализа свойств разработанных полимерных связующих пониженной горючести для разработки составов и технологий изготовления клеевых препрегов и ПКМ было выбрано клеевое связующее пониженной горючести марки ВСК-14-6.

3.2. Исследование реокинетических свойств клеевого связующего марки ВСК-14-6

Для того чтобы определить оптимальную технологию переработки связующего в процессе производства клеевого препрега, необходимо иметь информацию о таких характеристиках связующего, как:

- минимальная температура вязкости;
- время образования геля при заданной температуре обработки;

- температура начала отверждения.

Экспериментальные данные, необходимые для вычислений и создания кинетической модели реакции полимеризации, были собраны в одной серии экспериментов на термическом анализаторе.

Были исследованы процессы отверждения клеевого связующего марки ВСК-14-6 пониженной горючести в сравнении с клеевым связующим марки ВСК-14-1 с теплостойкостью 80 °С, не содержащим соединений, снижающих горючесть, с целью исследования влияния бромосодержащих олигомеров на процесс отверждения связующего. Исследование было выполнено с использованием метода динамической сканирующей калориметрии (ДСК) при динамическом повышении температуры 10 К/мин в окружающей атмосфере воздуха. Результаты исследований реакционной способности клеевого связующего марки ВСК-14-6 в сравнении с клеевым связующим ВСК-14-1 приведены на рисунке 3 и в таблице 10.

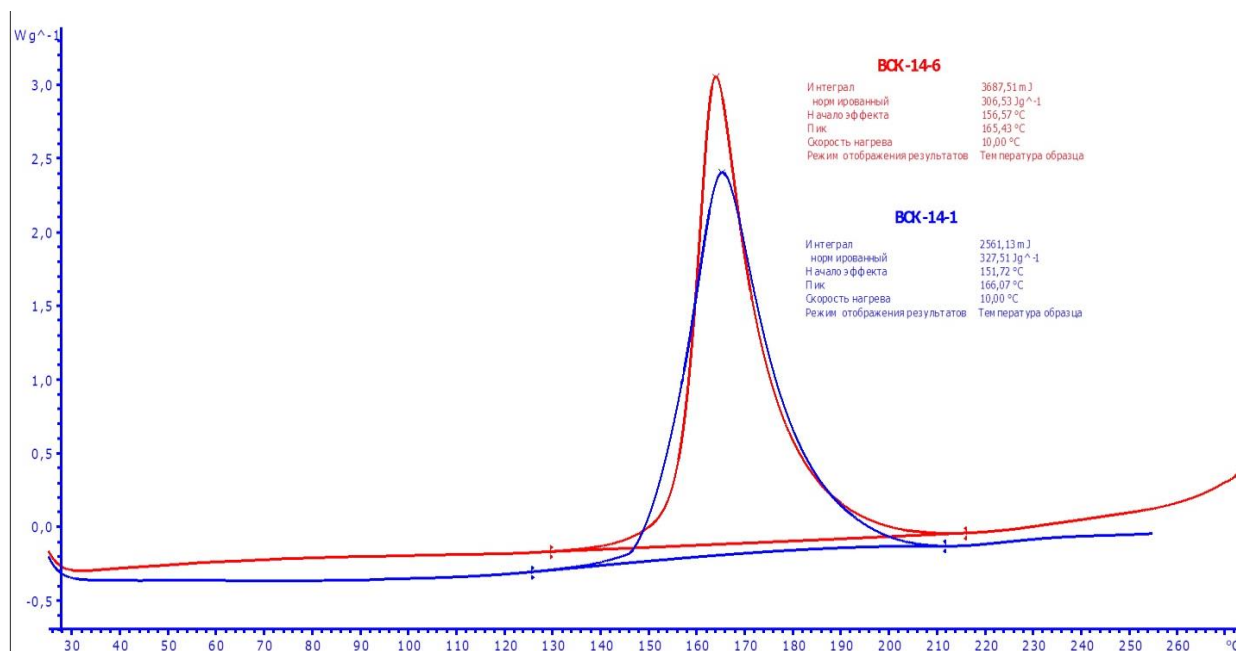


Рисунок 3 – Кинетика реакций процессов отверждения клеевых связующих марок ВСК-14-6 и ВСК-14-1

Таблица 10 – Температурные параметры процесса отверждения клеевого связующего ВСК-14-6 в сравнении с клеевым связующим ВСК-14-1

Наименование показателей	Значение показателей для клеевых связующих марок	
	ВСК-14-6	ВСК-14-1
Температура начала активной реакции отверждения связующего в препреге (скорость нагрева 10 К/мин), °С	156,6	151,7
Температура максимума пика отверждения связующего в препреге, °С	165,4	166,07
Тепловой эффект реакции отверждения, Дж/г	306,51	327,5

Как видно из рисунка 3, использование в составе клеевого связующего ВСК-14-6 бромосодержащих олигомеров приводит в сравнении со связующим ВСК-14-1 к незначительному сдвигу температурного диапазона реакции отверждения, протекающего от 130 до 216 °С. При этом температура максимума пика отверждения клеевого связующего ВСК-14-6 находится на уровне ВСК-14-1 и составляет 165,4 °С, а тепловой эффект снижается до 306,51 Дж/г (с 327,5 Дж/г для ВСК-14-1).

Пониженный тепловой эффект реакции отверждения клеевого бромосодержащего клеевого связующего марки ВСК-14-6 свидетельствует о его меньшей химической активности в сравнении с клеевым связующим ВСК-14-1. Это свойство является наиболее предпочтительным, поскольку позволяет расширить временной диапазон переработки связующего в клеевой препрег [102, 103].

Этот вывод был подтвержден в процессе исследования реологических характеристик (динамической вязкости) клеевого связующего марки ВСК-14-6 в сравнении с клеевым связующим марки ВСК-14-1.

С применением реометра в режиме контролируемого напряжения, равного 2 Па, при постоянной частоте 1,6 Гц были исследованы реологические свойства клеевого связующего ВСК-14-6 в сравнении с клеевым связующим ВСК-14-1. Результаты исследований представлены на рисунке 4.

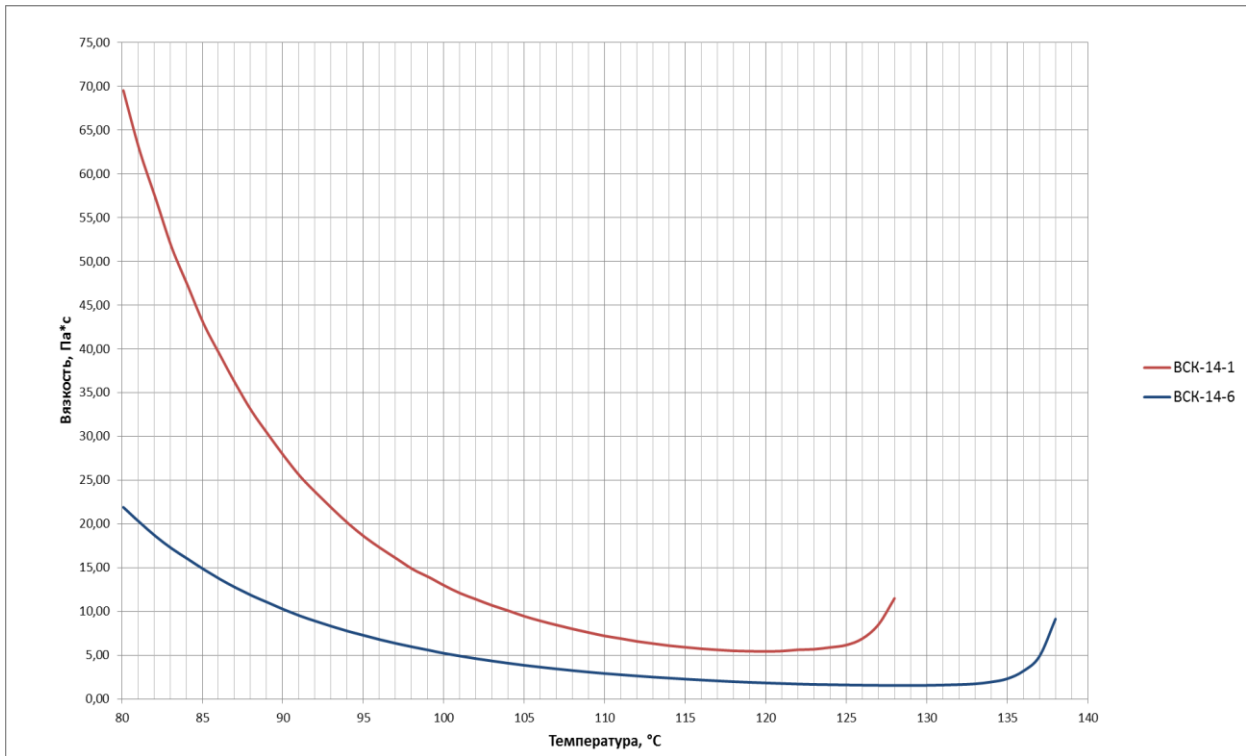


Рисунок 4 – Зависимость динамической вязкости клеевых связующих ВСК-14-6 и ВСК-14-1 от температуры

В зависимости от температуры динамическая вязкость связующих ВСК-14-6 и ВСК-14-1 в промежутке от 80 до 138 °С, представленная на рисунке 4, показывает, что клеевое связующее ВСК-14-6 обладает пониженными вязкостными характеристиками в сравнении со связующим ВСК-14-1: при повышении температуры динамическая вязкость клеевого связующего ВСК-14-6 понижается с 22 Па·с при 80 °С до 1,66 Па·с при 130 °С, в то время как вязкость связующего ВСК-14-1 понижается с 70 Па·с при 80 С до 5,4 Па·с при 120 °С. Следует отметить, что температура, при которой достигается наименьшее значение динамической вязкости для каждого связующего, не является оптимальной для переработки связующего в препрег, так как при последующем нагреве наблюдается скачкообразное повышение динамической вязкости, что характеризует начало реакции гелеобразования.

Также из рисунка 4 видно, что клеевое связующее марки ВСК-14-6, характеризующееся меньшей химической активностью по сравнению с клеевым связующим марки ВСК-14-1, обеспечивает более широкий температурный

диапазон переработки в клеевой препрег. Температура начала реакции гелеобразования для связующего ВСК-14-6 составляет 138 °С, для связующего ВСК-14-1 составляет 120 °С.

Таким образом, на основании выполненных исследований подтверждено преимущество клеевого связующего марки ВСК-14-6, которое в сравнении с клеевым связующим марки ВСК-14-1 обладает свойством пониженной горючести в сочетании с оптимальными технологическими свойствами при его переработке в клеевой препрег.

Кроме определения характера изменения реологических характеристик связующего в динамическом режиме, исследование времени гелеобразования связующего необходимо для того, чтобы исходя из этих данных разработать наиболее оптимальные температурно-временные режимы пропитки связующим наполнителя в процессе изготовления препрега.

Определение наилучшего интервала температур для переработки связующего в препрег зависит не только от низкой величины динамической вязкости при нанесении на наполнитель, но также от того, как меняется это значение со временем, что определяет продолжительность переработки связующего в препреге (период времени в процессе производства, в течение которого связующее нагревается при постоянной температуре без существенных изменений в вязкости) [35]. Следовательно, исследование реологических характеристик связующего ВСК-14-6 в условиях, схожих с условиями его переработки в процессе производства клеевого препрега, является важным для его практического применения.

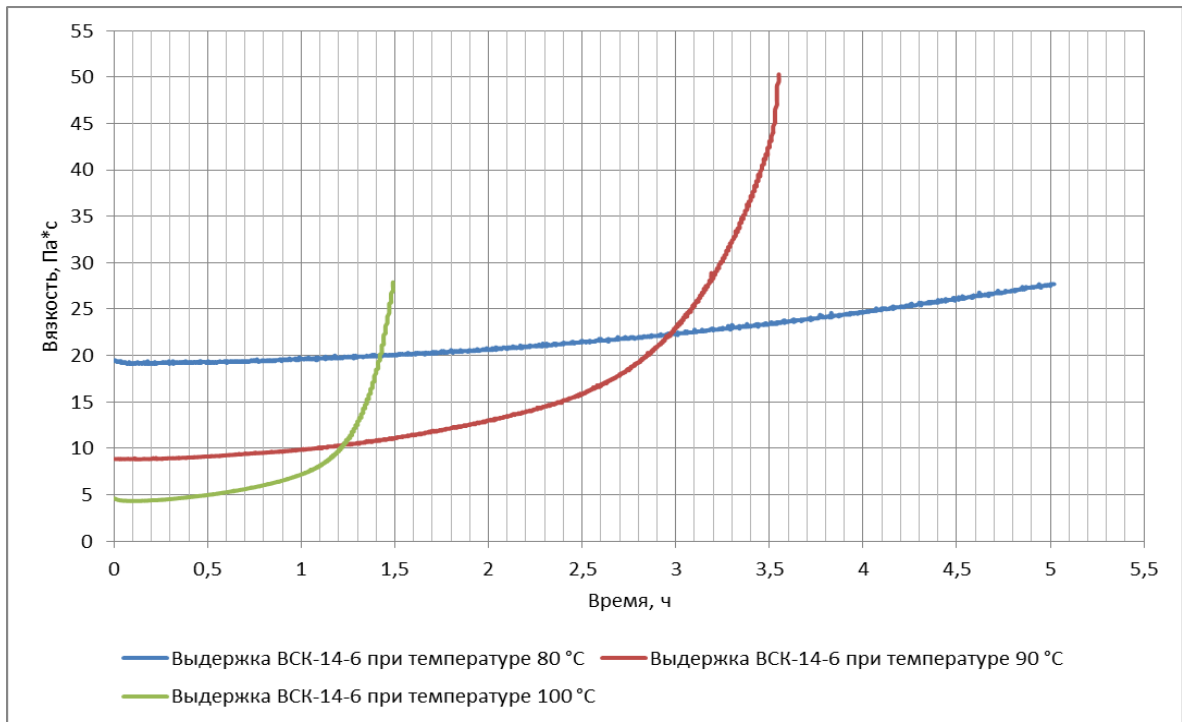


Рисунок 5 – Характер изменения динамической вязкости клеевого связующего ВСК-14-6 в зависимости от времени выдержки при различных температурах

Рисунок 5 демонстрирует, как меняется динамическая вязкость клеевого связующего ВСК-14-6 со временем при различных температурах. Анализ реологии клеевого связующего марки ВСК-14-6 при постоянной температуре с целью установления взаимосвязи между продолжительностью нагрева при температурах от 80 °C до 100 °C и вязкостью расплава связующего позволило установить, что продолжительный нагрев связующего при температуре 80 °C в течение 5 часов не вызывает существенного изменения вязкости расплава и, как следствие, гелеобразование в данном диапазоне не наступает. Длительный нагрев расплава связующего при температуре 90 °C через 2,75 часа приводит к началу существенного повышения вязкости, что свидетельствует о начале процесса гелеобразования. Нагрев расплава связующего при температуре 100 °C приводит к началу гелеобразования расплава связующего уже через 1 час.

Необходимо также учитывать, что температура связующего во время пропитки армирующего материала не должна превышать температуру начала процесса отверждения, иначе имеется вероятность начала неконтролируемой

реакции полимеризации связующего, что приводит к наработке бракованного препрега и в некоторых случаях может явиться причиной выхода из строя пропиточной установки. Поэтому важно учитывать температуру, при которой начинается процесс отверждения связующего, что представляет собой еще один ключевой параметр производства, который всегда учитывается при создании технологического процесса изготовления препрега.

Таким образом, исходя из анализа характера изменения реокинетических свойств связующего марки ВСК-14-6 в зависимости от температуры, представленных на рисунках 3 - 5, определен температурный диапазон переработки клеевого связующего марки ВСК-14-6 в ходе технологического процесса изготовления клеевого препрега, который составляет (80 – 85) °С.

3.3. Разработка составов клеевых препрегов угле-стеклопластиков пониженной горючести на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6

При создании высокопрочных пожаробезопасных ПКМ на основе клеевых препрегов, наиболее важным параметром является снижение величины поступающего теплового потока в материал и, как следствие, уменьшение тепла, расходуемого на прогрев и термодеструкцию полимерной матрицы, а, следовательно, и количество образующихся газообразных горючих продуктов.

В работе [86] описывается эффект влияния поверхностной плотности стеклоткани на кинетику тепловыделения в результате воздействия теплового потока, который может быть объяснён на основе работы так называемых «тепловых экранов». Отмечено, что одним из важнейших вопросов обеспечения пожаробезопасности является надёжность экранирования зон с высокой вероятностью возникновения пожара (пожароопасных зон) от других элементов планера, пассажирских и багажно-грузовых отсеков. Под действием пламени и теплового потока происходит термодеструкция, газификация и постепенное выгорание полимерной матрицы композиционного материала в трансверсальном направлении, в результате чего обнажаются слои инертного наполнителя. Также автор в своей работе указывает на то, что в условиях передачи тепла

преимущественно лучистым потоком, слои стеклоткани работают как тепловые экраны, в результате чего попадающий на остаток матрицы тепловой поток многократно уменьшается, что приводит к снижению интенсивности прогрева материала и изменению скорости его термодеструкции. Этот эффект усиливается с увеличением количества слоев стеклонеполнителя.

Однако необходимо учитывать, что увеличение содержания слоев наполнителя существенным образом увеличивает массу агрегатов из ПКМ и тем самым снижает весовую эффективность изделия в целом, что противоречит современным техническим требованиям к конструкциям из ПКМ.

На основании выполненных ранее исследований можно предположить, что использование в составе ПКМ связующего пониженной горючести будет способствовать существенному снижению скорости деструкции матрицы в составе ПКМ, что повысит эффективность применения материалов, обладающих пониженной горючестью, и будет отвечать техническим требованиям, предъявляемым к данному классу материалов.

Таким образом, российские материалы, создаваемые с применением связующего ВСК-14-6 с пониженной горючестью в качестве полимерной матрицы и углеродных и стеклянных наполнителей, должны соответствовать определенным техническим требованиям:

- разрабатываемый углепластик по прочности на растяжение должен превышать прочность аналогов – российского углепластика на основе наполнителя Элур П «А» и зарубежного углепластика на основе препрега HexPly M26/M26T/45%/G1070 фирмы Hexcel (США);
- разрабатываемый стеклопластик по прочности на растяжение должен превышать прочность аналогов – российского стеклопластика на основе наполнителя Т-10-14 и зарубежного стеклопластика на основе препрега HexPly M26/M26T/50%/7581 фирмы Hexcel (США).

Характеристики разрабатываемого композитного материала из углепластика с применением клеевого связующего марки ВСК-14-6, обладающего низкой

горючестью, сопоставлены с данными по аналогичным материалам, представленными в таблице 11.

Таблица 11 – Основные технические требования к характеристикам разрабатываемого углепластика на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 в сравнении с аналогами

Наименование характеристики	Технические требования к разрабатываемому углепластику	Характеристики аналогов	
		углепластика на основе препрега КМКУ-6.80.Э0,1 (Россия)	углепластика на основе препрега HexPly M26/M26T/45%/G1070 (США)
Прочность при растяжении, МПа	≥ 1400	910	790
Прочность при сжатии, МПа	≥ 900	600	900
Горючесть ПКМ	трудногорающий	трудногорающий	
Жизнеспособность при температуре 23°C, сутки	90	90	30

Характеристики разрабатываемого композитного материала из стеклопластика с применением клеевого связующего марки ВСК-14-6, обладающего низкой горючестью, сопоставлены с данными по аналогичным материалам, представленными в таблице 12.

Таблица 12 – Основные технические требования к характеристикам разрабатываемого стеклопластика на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 в сравнении с аналогами

Наименование характеристики	Технические требования к разрабатываемому стеклопластику	Характеристики аналогов	
		стеклопластика на основе препрега КМКС-6.80.Т10 (Россия)	стеклопластика на основе препрега HexPlyM26/M26T/50%/7581 (США)
Прочность при растяжении, МПа	≥ 1300	615	410
Прочность при сжатии, МПа	≥ 550	550	520
Горючесть ПКМ	трудногорающий	трудногорающий	
Жизнеспособность при температуре 23°C, сутки	90	90	30

Как упоминалось ранее, для создания композитных материалов, изготовленных путем применения связующего ВСК-14-6, стеклянных и углеродных волокон, для производства клееных конструкций, включая элементы большой толщины и обшивку "сэндвич" конструкций, соответствующих требованиям АП-25 Приложение F Часть I, требуется использование современных высокоэффективных наполнителей взамен ранее используемых наполнителей – стеклоткани конструкционной Т-10-14 и углеродной ленты Элур П «А», что позволит обеспечить повышение прочностных свойств и снижение интенсивности тепловыделения при горении композиционного материала.

Для увеличения уровня прочностных свойств, а также снижения горючести ПКМ, на основании анализа научно-технической информации, представленной в разделе 1, и технических требований к технологическим и прочностным характеристикам ПКМ на угле- и стеклонаполнителях, для изготовления экспериментальных образцов клеевых препрегов применительно к изготовлению клееных конструкций в качестве наполнителей были выбраны следующие наполнители:

- углеродная однонаправленная лента Ст-11088 (из углеродного жгута УВ-12К);
- углеродный однонаправленный жгут УВ-12К;
- стеклоткань Т-60/2(ВМП).

Проведено исследование методов создания препрегов на основе связующего марки ВСК-14-6, обладающего теплостойкостью 80 °С на оборудовании для изготовления препрегов: КМКУ-6.80.Ст-11088 с угленаполнителем – углеродной однонаправленной лентой Ст-11088; КМКУ-6.80.УВ с угленаполнителем – углеродным жгутом УВ-12К; КМКС-6.80.Т60(ВМП) с стеклонаполнителем – стеклотканью Т-60(ВМП) для изготовления клеевых композитных материалов высокого качества (без дефектов - перетяжек, расхождения волокон), чтобы обеспечить отклонение объемной доли связующего в составе препрега не более 2% от номинального значения.

Технологические операции по изготовлению препрегов включают в себя

нанесение связующего наносящими узлами установки в расплавленном виде на антиадгезионную подложку (бумагу) с применением нагреваемых валов, последующее двустороннее дублирование наполнителя в узлах нагревающих каландров с последующим наматыванием клеевого препрега с разделительной пленкой в рулон (рисунок 6).



Рисунок 6 – Установка для изготовления клеевых препрегов на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6

Процесс настройки технологических операций изготовления клеевых препрегов основывался на результатах исследований реологических характеристик клеевого связующего ВСК-14-6 в динамическом и изостатическом режимах.

Изменялись следующие факторы: температура валов верхнего и нижнего узлов, используемых для нанесения связующего, температура при каландровании, скорость линии при пропитке для определения доли связующего в клеевом материале. Влияние параметров процесса производства клеевых материалов на содержание связующего представлено в таблице 13.

Таблица 13 – Влияние технологических параметров процесса изготовления клеевых препрегов на содержание связующего в препреге

Обозначение режима изготовления клеевых препрегов		Температура валов узла нанесения связующего, °С	Скорость линии пропитки, п.м./мин	Содержание связующего в препреге, %
1-	1	70 ± 2	2	42÷48
	2	80 ± 2	3	41÷47
	3	90 ± 2	4	39÷45
2-	1	70 ± 2	2	35÷45
	2	80 ± 2	3	37÷45
	3	90 ± 2	4	37÷43
3-	1	70 ± 2	2	38÷45
	2	80 ± 2	3	38÷42
	3	90 ± 2	4	39÷44

Температура валов, используемых для нанесения связующего, каландров и нагревательных столов, варьировались в интервале температур 70 – 90 °С. Установлено, что оптимальное содержание связующего с минимальным разбросом (38 – 40 %) достигается при температуре валов узла для нанесения связующего, равной 80 ± 2 °С, что сопоставимо с полученными ранее реологическими характеристиками связующего марки ВСК-14-6, представленными на рисунках 4 и 5, а также температурой каландров и нагревательных столов, равной 90 ± 2 °С.

Размер зазора между валами, используемых для нанесения связующего, который обеспечивает однородное распределение связующего в составе клеевого материала и точное выравнивание с угле-стеклонаполнителем, рассчитывался исходя из требований к толщине единичного слоя разрабатываемого однонаправленного материала с учетом толщины подложки и пленки. Выбраны режимы, при которых получали препреги с отклонением содержания клеевого связующего ± 2 %. Данная технология позволяет изготавливать клеевые препреги с наносом связующего 38 – 42 % для изготовления монолитных конструкций и наносом связующего 58 – 62 % для изготовления сотовых конструкций.

Скорость производственной линии выбиралась такой, чтобы обеспечить получение препрегов надлежащего качества (равномерность пропитки контролировалась визуально).

На основании результатов исследований, применительно к установке для изготовления клеевых препрегов разработана технология изготовления калиброванных клеевых препрегов марок КМКУ-6.80.Ст-11088, КМКУ-6.80.УВ и КМКС-6.80.Т60(ВМП) на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 и новых угле- и стеклонаполнителей; разработана соответствующая технологическая документация, включающая в себя технологические режимы, обеспечивающие отклонение по весовому содержанию связующего в клеевых препрегах - не более 2% от номинальной величины.

Основные характеристики угленаполнителей, которые были выбраны для изготовления клеевых препрегов, представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Основные характеристики углеродных волокон HTS45 E23 12K и УВ-12К

Наименование показателя	Значение показателя для марки волокна	
	HTS45 E23 12K	УВ-12К
Прочность при растяжении, МПа, не менее	4500	3800
Модуль упругости, ГПа	240	230 – 275
Удлинение при разрыве, %, не менее	1,9	1,8
Линейная плотность (без замасливателя), текс	800	800 ± 20
Плотность, г/см ³	1,77	1,80 ± 0,02

Автоклавным методом формования из клеевых препрегов КМКУ-6.80.Ст-11088, КМКУ-6.80.УВ и КМКС-6.80.Т60(ВМП) были получены экспериментальные образцы углепластиков и исследованы их основные свойства (таблица 15).

Таблица 15 – Основные свойства экспериментальных образцов углепластиков из клеевых препрегов на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 и выбранных угленаполнителей (углеродной ленты Ст-11088, углеродного жгута УВ-12К) в сравнении с аналогами (средние значения)

Наименование материала	Прочность при растяжении, МПа, при 20 °С	Прочность при сжатии, МПа, при 20 °С
Разрабатываемый материал		
Углепластик на основе клеевого препрега из углеродного жгута УВ-12К	2430	925
Углепластик на основе клеевого препрега из углеродной ленты Ст-11088	2030	690
Аналоги		
Углепластик на основе препрега HexPly M26/M26T/45%/G1070 (США)	790	900
Углепластик на основе клеевого препрега КМКУ-6.80.Э0,1	910	799

Было установлено, что прочность экспериментальных образцов углепластика, изготовленных на основе клеевого связующего ВСК-14-6 и углеродных наполнителей - углеродной ленты Ст-11088 и углеродного жгута УВ-12К, превышает прочность при растяжении более чем в два раза зарубежный аналог - углепластик на основе препрега HexPly M26/M26T/45%/G1070 фирмы Hexcel (США).

Установлено также, что экспериментальные образцы углепластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 и углеродной ленты Ст-11088 и углеродного жгута УВ-12К по прочности при растяжении превышают более чем в 2 раза свойства разработанного ранее углепластика на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.Э0,1, а по прочности при сжатии квотой превосходства в сравнении с аналогом – углепластиком на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.Э0,1 обладает углепластик на основе углеродного жгута УВ-12К, которая составляет 16 %.

По результатам полученных данных можно сделать вывод о правильности выбора углеродных наполнителей для разработки с их использованием углепластиков с требуемым уровнем прочностных характеристик. Однако в

настоящее время закупки в РФ углеродного жгута марки HTS45 E23 12K фирмы Toho Tenax (Япония) недоступны, в связи с чем его использование при разработке углепластика нецелесообразно. На этом основании дальнейшие исследования по разработке углепластика проводились с использованием углеродного жгутового наполнителя марки УВ-12К, который по своим техническим характеристикам находится на уровне японского углеродного жгута.

В работе [37] приведены результаты испытаний образцов из углеродных волокон УВ-12К и HTS45 E23 12К и микропластиков на их основе. Результатами исследований, приведенных в данной работе, установлено, что углеродное волокно марки УВ-12К является аналогом HTS45 E23 12К, что дополнительно подтверждает правильность выбора данного углеродного наполнителя.

Далее были изготовлены экспериментальные образцы стеклопластика, изготовленных из клеевого препрега на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 и выбранного стеклянного наполнителя – однонаправленной стеклоткани марки Т-60/2(ВМП), и исследованы его свойства в сравнении с аналогами. Результаты испытаний представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Свойства экспериментальных образцов стеклопластика из клеевого препрега на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 и стеклоткани Т-60/2(ВМП)-14 в сравнении с аналогами (средние значения)

Наименование материала	Прочность при растяжении, при 20°С, МПа	Прочность при сжатии при 20°С, МПа
Разрабатываемый материал		
Стеклопластик на основе клеевого препрега из стеклоткани Т-60/2(ВМП)-14	1400	950
Аналоги		
Стеклопластик на основе клеевого препрега КМКС-6.80.Т10 из стеклоткани Т-10-80	615	585
Стеклопластика на основе препрега HexPly M26/M26T/50%/7581 (США)	410	520

Проведенные исследования, результаты которых приведены в таблице 16, показали, что стеклопластик, изготовленный с использованием клеевого

связующего ВСК-14-6 и стеклоткани Т-60/2(ВМП)-14, обладает более чем в три раза большей прочностью при растяжении, чем зарубежный аналог – стеклопластик на основе препрега HexPly M26/M26T/50%/7581 от компании Hexcel (США).

Также установлено, что стеклопластик с клеевым связующим ВСК-14-6 и стеклотканью Т-60/2(ВМП)-14 имеет вдвое большую прочность при растяжении по сравнению с ранее разработанным клеевым препрегом стеклопластика марки КМКС-6.80.Т10 на основе стеклоткани Т-10-80 и клеевым связующим ВСК-14-6, причем его прочность при сжатии также превосходит его более чем вдвое. Исходя из этих данных, можно сделать вывод о правильности выбора стеклянного наполнителя.

3.4. Исследование кинетики реакций отверждения клеевых препрегов углеродных и стеклопластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6

Отверждение полимерных композиционных материалов методом автоклавного формования можно представить следующим образом: тепловой поток, создаваемый на поверхности технологического пакета путем теплопередачи нагретого инертного газа, проникает вглубь материала, увеличивая его внутреннюю энергию, при достижении определенной температуры в материале начинаются процессы полимеризации, сопровождающиеся выделением значительного количества энергии в единицу времени.

При проведении термокинетических расчётов [104] образец препрега отверждали и исследовали методом ДСК, нагревая его равномерно при постоянных температурных показателях. Основной идеей этого подхода является прямая зависимость скорости химической реакции отверждения от количества тепла, выделяющегося в процессе полимеризации [105]. Полученные данные применялись для оценки параметров кинетических уравнений реакции (активационная энергия, порядок реакции, предэкспоненциальный множитель) и для разработки и решения сложного уравнения, учитывающего разнообразные параллельные и последовательные химические превращения. С использованием

метода ДСК изучалась скорость отверждения клеевого связующего марки ВСК-14-6 в препрегах с различными наполнителями и содержанием клеевого связующего (для монолитных и сотовых конструкций различной структуры), что позволило определить кинетические характеристики процессов отверждения (рисунки 7-10, таблица 17) [106].

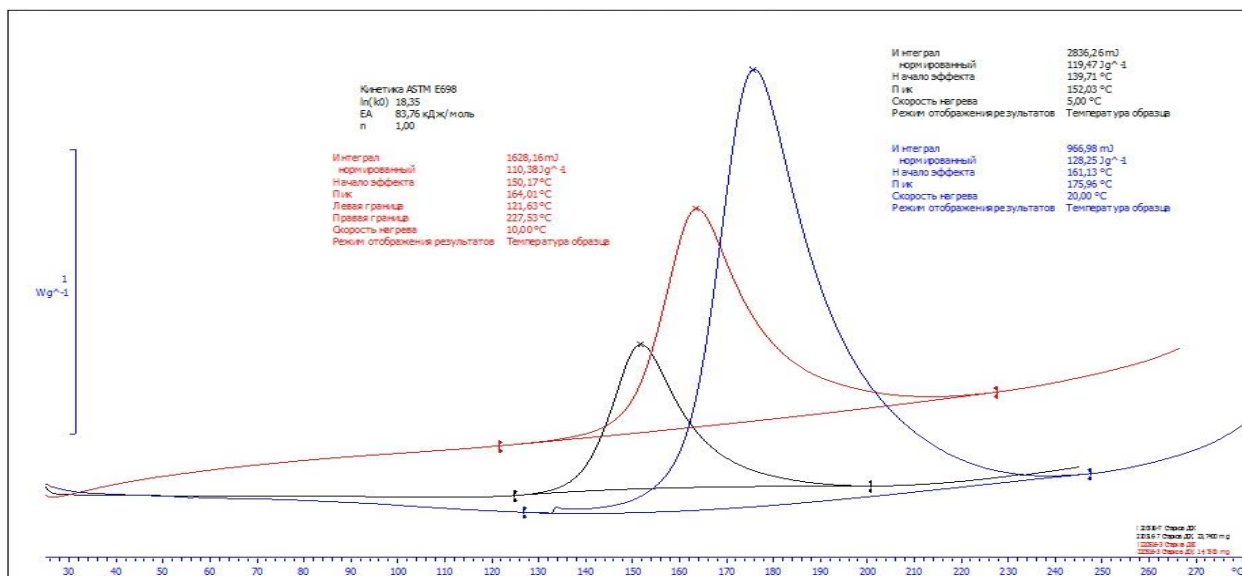


Рисунок 7 – Экспериментальные кривые ДСК реакции отверждения образцов клеевого препрега углепластика марки КМКУ-6.80.УВ.45 при разных скоростях нагрева

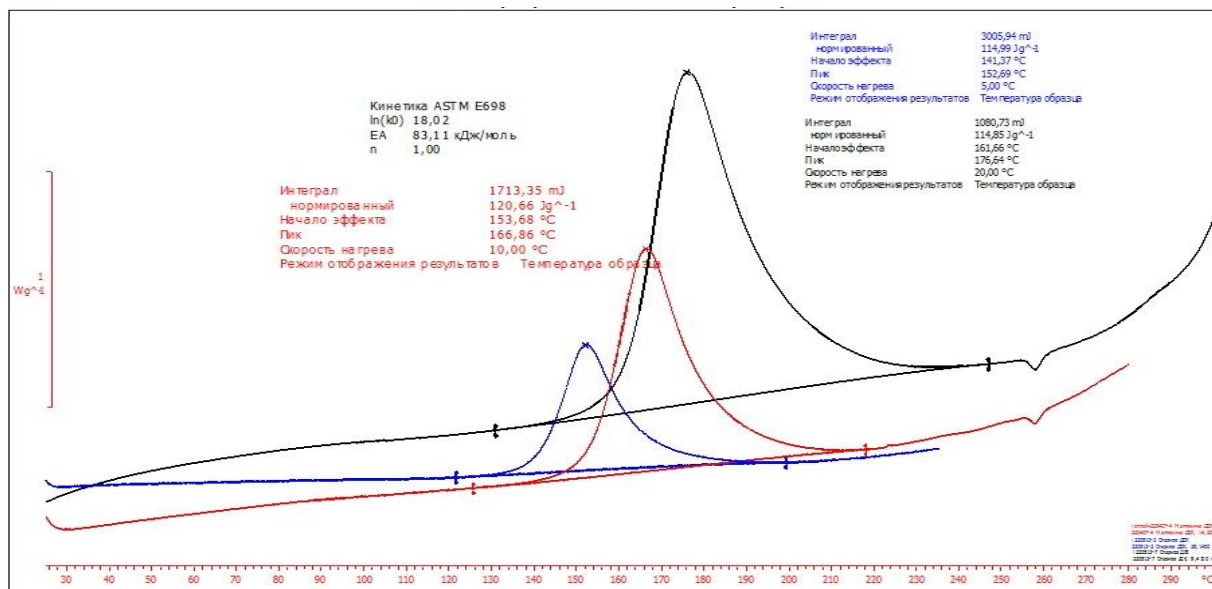


Рисунок 8 – Экспериментальные кривые ДСК реакции отверждения образцов клеевого препрега стеклопластика марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).37 при разных скоростях нагрева

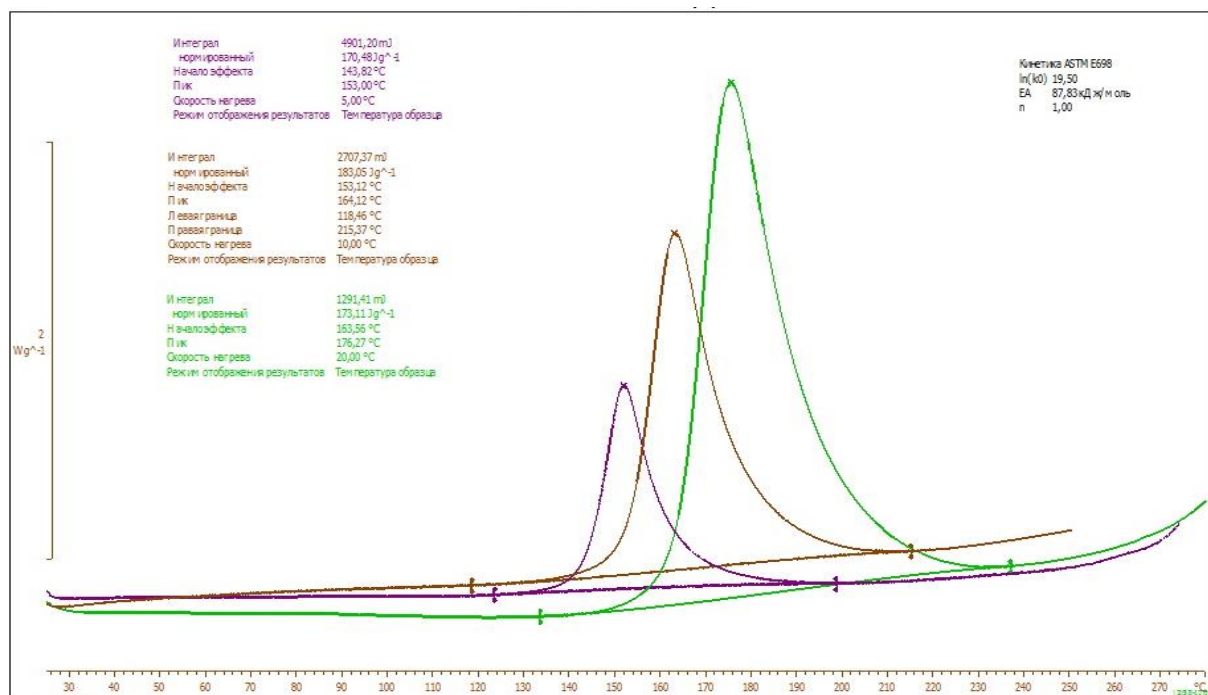


Рисунок 9 – Экспериментальные кривые ДСК реакции отверждения образцов клевого препрега углепластика марки КМКУ-6.80.УВ.65 при разных скоростях нагрева

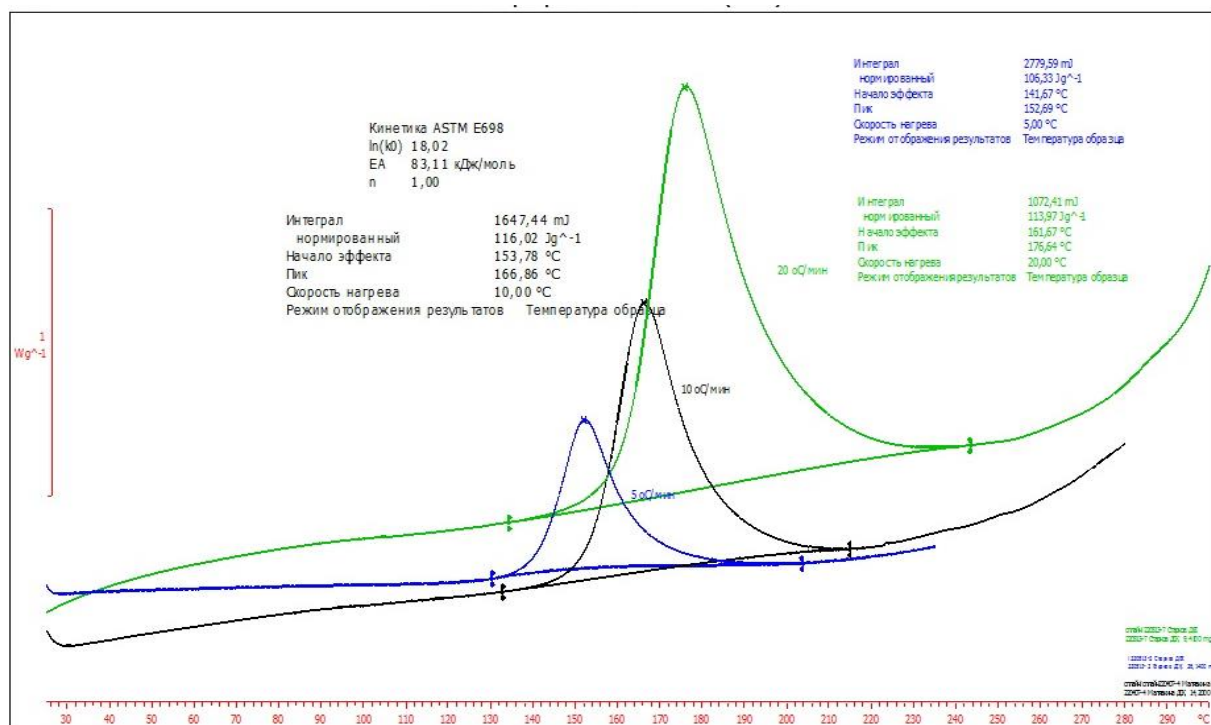


Рисунок 10 – Экспериментальные кривые ДСК реакции отверждения образцов клевого препрега стеклопластика марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).55 при разных скоростях нагрева

Таблица 17 – Характеристические температуры и тепловой эффект реакции отверждения препрегов

Марка препрега	Тепловой эффект, Дж/г			T ₀ , начало активной реакции отверждения, °C			T _m , температура пика реакции отверждения, °C		
	5 К/мин	10 К/мин	20 К/мин	5 К/мин	10 К/мин	20 К/мин	5 К/мин	10 К/мин	20 К/мин
КМКУ-6.80.УВ.45	120,2	110,3	125,5	139,6	150,2	161,2	152,0	164,0	175,9
КМКС-6.80.Т-60(ВМП).37	114,9	120,6	114,8	141,4	153,7	161,6	152,7	166,8	176,6
КМКУ-6.80 УВ.65	170,4	183,1	173,1	143,8	153,1	163,5	153,0	164,1	176,3
КМКС-6.80.Т-60(ВМП).55	106,3	116,0	113,9	141,7	153,8	161,7	152,7	153,7	161,7
ВСК-14-6	-	306,5	-	-	156,6	-	-	165,4	-

Сравнение данных, полученных в ходе анализа кривых ДСК отверждения клеевого материала ВСК-14-6 и этого же материала в составе угле- и стеклопрепегов с наполнителями (см. рисунки 7-10), показывает одинаковую температуру экзотермического пика при скорости повышения температуры на 10 К/мин независимо от типа наполнителя.

В итоге экспериментов по изучению отверждения клеевого связующего ВСК-14-6 в образцах угле- и стеклопрепегов при помощи метода ДСК были определены сценарии реакций отверждения, количественные и качественные характеристики этапов отверждения. Были получены данные о реакциях: коэффициенты предэкспоненциального множителя, энергия активации, коэффициент автоускорения. Результаты вычислений отражены на рисунках 11 и 12.

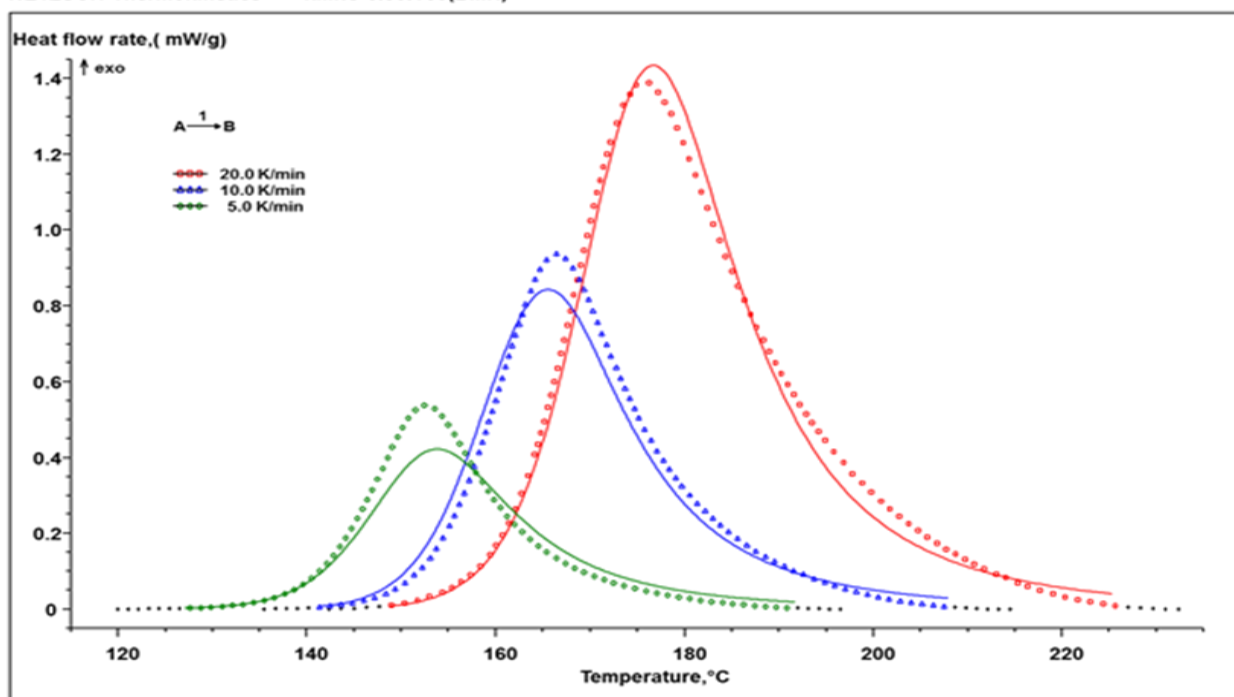


Рисунок 11 – Кривые ДСК реакции отверждения образцов препрегов углепластика марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).37 эксперимент (точки) и расчет (сплошная линия)

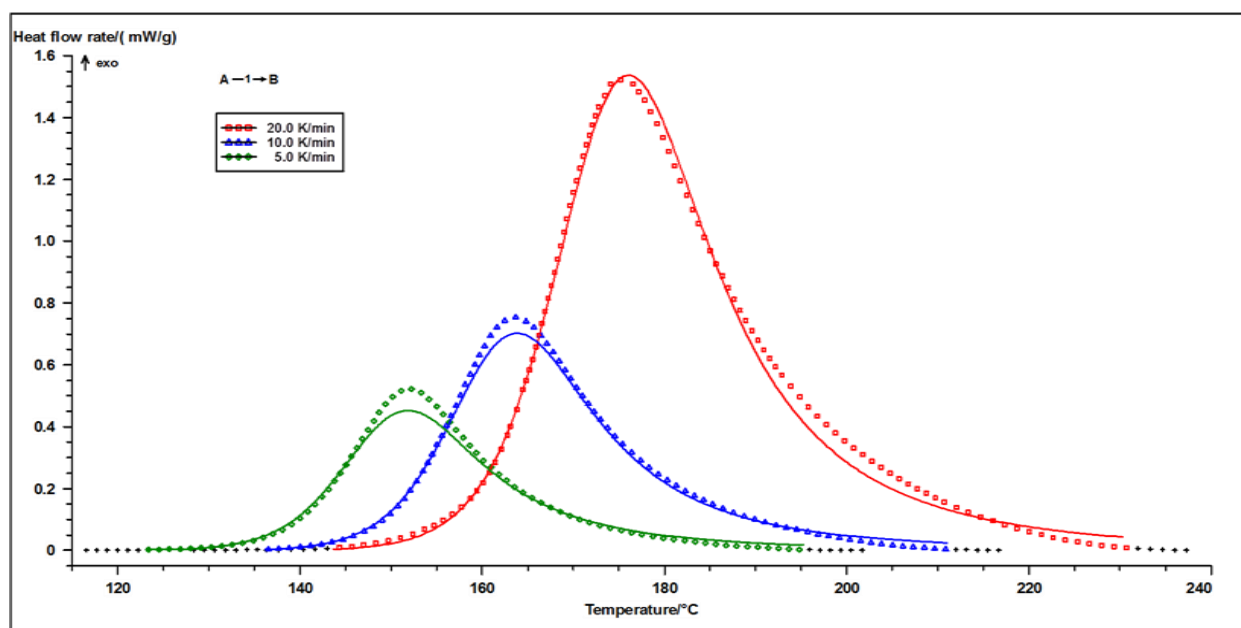


Рисунок 12 – Кривые ДСК реакции отверждения образцов препрегов углепластика марки КМКУ-6.80.УВ.45 эксперимент (точки) и расчет (сплошная линия)

Сходимость экспериментальных кривых с расчётными кривыми (рисунках 11 и 12), говорит об адекватности выбранной модели отверждения клеевого связующего ВСК-14-6 в составе клеевых препрегов.

В таблице 18 приведены кинетические параметры отверждения препрегов углепластика марки КМКУ-6.80.УВ.45 и препрега стеклопластика марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).37.

Таблица 18 – Кинетические параметры реакции отверждения образцов препрега углепластика и стеклопластика

Показатели, размерность	Значения для клеевого препрега марки	
	КМКУ-6.80. УВ.45	КМКС-6.80. Т60(ВМП).37
Предэкспоненциальный множитель A_1 , c^{-1} , $\log(A_1, c^{-1})$	18,02	18,35
Энергия активации E_1 , кДж/моль	83,11	83,76
Порядок реакции n_1	1	1

На основе полученных математических моделей процесса отверждения образцов препрега были разработаны температурно-временные режимы отверждения клеевых препрегов углепластика марки КМКУ-6.80.УВ.45 и стеклопластика марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).37.

На основании изложенного можно констатировать, что на поведение механизма отверждения эпоксидного клеевого связующего марки ВСК-14-6 углеродный и стеклянный наполнитель влияния не оказывает. Исключение одноступенчатого режима формования монолитных конструкций из ПКМ в НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ было обусловлено опытом, позволившим специалистам избежать вероятности перегрева внутренних слоев эпоксидных матриц и гарантировать качество монолитных конструкций. Применение двух- или многоэтапного нагрева в процессе отверждения связующего ведет к существенному снижению саморазогрева и обеспечивает равномерное отверждение композитного материала по всей толщине. Для этой цели, учитывая определенную температуру пика реакции отверждения клеевого связующего

ВСК-14-6 (165,4 °С), проведено моделирование трехступенчатого температурно-временного режима отверждения клевого препрега КМКУ-6.80.УВ.45.

На рисунках 13 и 14 изображен режим отверждения, который учитывает выделение тепла при отверждении клевого связующего.

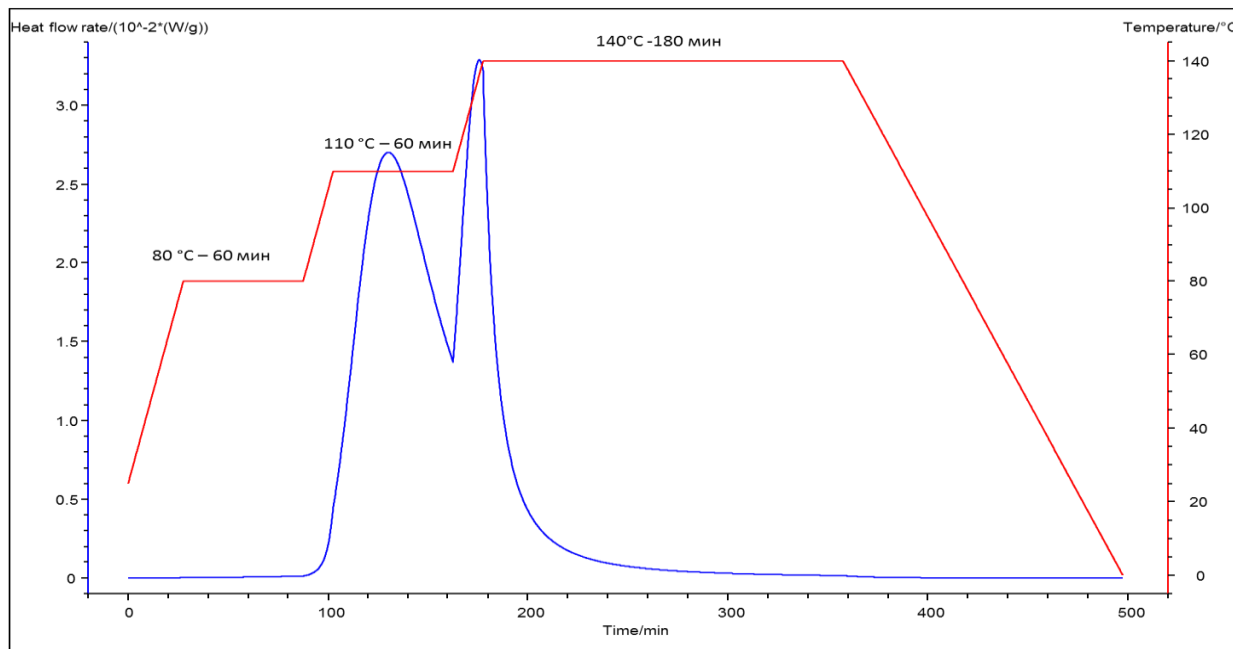


Рисунок 13 – Процесс тепловыделения ΔH реакции отверждения клевого связующего марки ВСК-14-6 в препреге углепластика марки КМКУ-6.80.УВ.45

Как видно из рисунка 13, процесс отверждения эпоксидной матрицы в составе клевого препрега углепластика марки КМКУ-6.80.УВ.45 следует выполнять в три этапа. На первом этапе происходит перераспределение клевого связующего по объему полимерного композитного материала вследствие снижения вязкости связующего. Второй этап препятствует активному химическому процессу отверждения связующего, что и позволяет не допустить его саморазогрева. Окончательное отверждения композиционного материала происходит во время выдержки при высокой температуре (140 °С) в течение 180 минут.

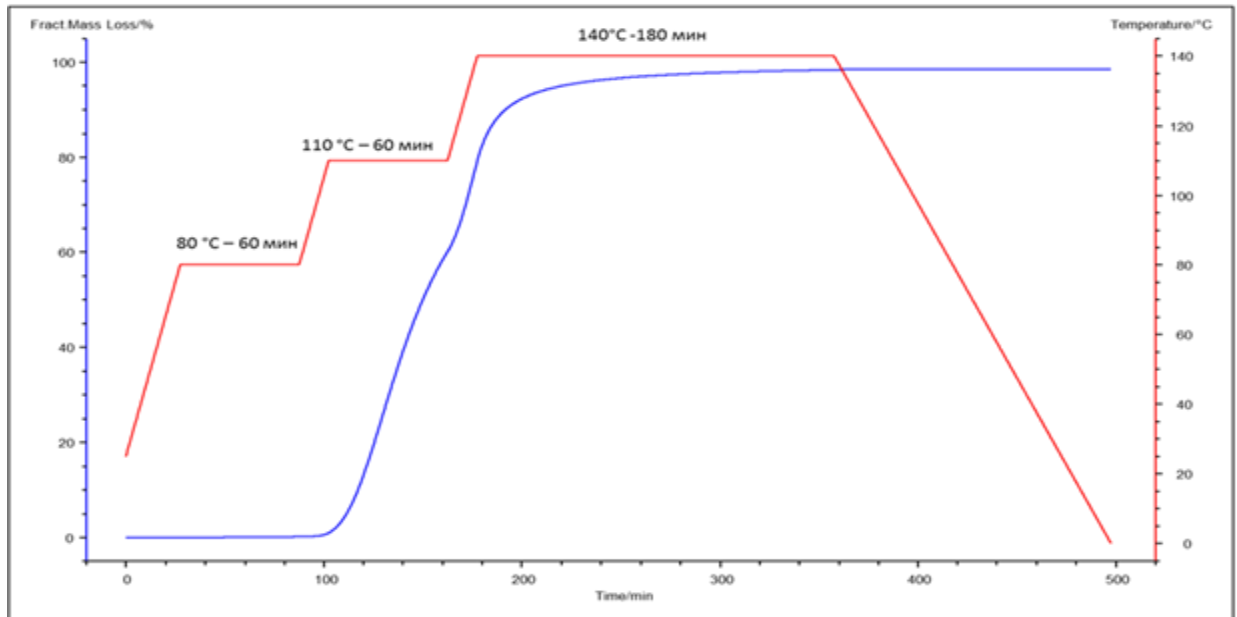


Рисунок 14 – Степень отверждения клеевого связующего марки ВСК-14-6 в препреге углепластика марки КМКУ-6.80.УВ.45

Полученные данные подтверждают правильность установления температурно-временного режима отверждения клеевого препрега углепластика марки КМКУ-6.80.УВ.45: первая ступень (80 ± 5) °C в течение (60 ± 5) минут, вторая ступень (110 ± 5) °C в течение (60 ± 5) минут, третья ступень (140 ± 5) °C в течение (180 ± 5) минут. Данный режим применим для получения ПКМ, в том числе толстостенных панелей, с толщиной до 12 мм. В случае получения деталей свыше 12 мм необходима корректировка технологического режима отверждения с увеличением времени выдержки, которое затрачивается на прогрев внутренних слоев детали.

Методом [107] термического анализа была определена степень отверждения. Как видно из рисунка 14, степень отверждения клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ.45 достигает 99,7 %, что подтверждает корректность смоделированного режима. Ввиду того, что активного химического влияния на протекание процесса отверждения клеевого связующего марки ВСК-14-6 углеродный и стеклянный наполнитель не оказывает, подобранный режим отверждения полимерной эпоксидной матрицы может быть также применен при отверждении клеевых препрегов стеклопластика марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).37.

3.4.1. Исследование и корректировка режима отверждения клеевых препрегов угле-стеклопластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 применительно для сотовых конструкций

Для изготовления трехслойных сотовых конструкций, когда формирование обшивки из клеевых препрегов и приклеивание ее к сотовому заполнителю происходит за одну технологическую операцию, требуется внесение изменений в режим формования деталей и агрегатов, разработанный для монолитных конструкций. Эти изменения необходимы ввиду применения препрега с уменьшенным содержанием связующего для формирования обшивки сотовой конструкции, а также применения клеевого препрега с увеличенным содержанием связующего для приклеивания сот к обшивке. Необходимость применения клеевого препрега с увеличенным содержанием клеевого связующего в процессе изготовления сотовой конструкции вызвана тем, что избыток связующего требуется для образования галтелей на торцах сот, за счет чего увеличивается площадь склеивания обшивки с сотовым заполнителем и повышается прочность клеевого соединения.

При использовании клеевых препрегов с увеличенным содержанием клеевого связующего ВСК-14-6 следует учитывать повышенную текучесть связующего, проявляющуюся в процессе его отверждения.

Проведено исследование влияния режима отверждения на прочность клеевого соединения на равномерный отрыв отвержденной обшивки от сотового заполнителя. Результаты испытаний представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Результаты испытаний на равномерный отрыв обшивки из клеевых препрегов КМКУ-6.80.УВ.65 и КМКС-6.80.Т60(ВМП).55 от сотового заполнителя

Наименование характеристики, НД	Режим отверждения		Марка клеевого препрега	
	Температура, °С	Время, мин	КМКУ-6.80.УВ.65	КМКС-6.80.Т60(ВМП).55
Предел прочности при отрыве обшивки от сотового заполнителя, $\sigma_{отр}$, МПа ГОСТ 14760-69	80 ± 5	60 ± 5	2,8	3,7
	110 ± 5	60 ± 5		
	140 ± 5	180 ± 5		
	80 ± 5	60 ± 5	5,9	7,0
	140 ± 5	180 ± 5		

По результатам испытаний установлено, что при испытании образцов клеевых соединений на равномерный отрыв обшивки из клеевых препрегов КМКУ-6.80.УВ.65 и КМКС-6.80.Т60(ВМП).55 от сотового заполнителя, отвержденного по разработанному трехступенчатому режиму отверждения, констатирован характер разрушения по клеевому соединению, что свидетельствует о том, что прочность клеевого соединения ниже прочности сотового заполнителя из фольги АМг2Н, яч. 2,5мм. При испытании образцов, отвержденных по двухступенчатому режиму отверждения, зафиксирован характер разрушения по сотовому заполнителю, что свидетельствует о том, что прочность клеевого соединения выше прочности сотового заполнителя из фольги АМг2Н, яч. 2,5мм.

Установлено, что при формировании сотовой конструкции из клеевых препрегов с увеличенным содержанием связующего по трехступенчатому режиму, разработанному для монолитных конструкций и исключающему саморазогрев связующего в процессе отверждения, наличие второй технологической ступени при температуре $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ в течение (60 ± 5) минут приводит к стеканию связующего марки ВСК-14-6 по стенкам сотового заполнителя. За счет этого происходит уменьшение площади склеивания и снижение прочности клеевого соединения. В ходе корректировки технологических параметров трехступенчатого процесса применительно к процессу формирования образцов сотовой конструкции была установлена необходимость исключения второй технологической ступени при температуре $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ в течение (60 ± 5) минут.

Установлено, что процесс формирования сотовых конструкций следует проводить в две стадии, в ходе которого на первой стадии при температуре $(80 \pm 5) ^\circ\text{C}$ в течение (60 ± 5) минут за счет термоусадки связующего происходит его натек на торцах сот с образованием качественных галтелей, а на второй стадии формирования сотовой конструкции при температуре $140 ^\circ\text{C}$ в течение (180 ± 5) минут достигается полное отверждение связующего.

3.5. Разработка и исследование свойств полимерных композиционных материалов (угле- и стеклопластика) на основе клеевых препрегов

На основании проведенных исследований представленных в разделе 3.2 – 3.4 разработаны полимерные композиционные материалы:

1. Углепластик марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ;
2. Стеклопластик марки ВПС-68 на основе клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).

3.5.1. Исследование микроструктуры угле- и стеклопластиков

Использование растровой электронной микроскопии с применением ионно-плазменного травления образца является эффективным методом изучения коллоидно-дисперсного строения отвержденных термореактивных полимеров. Высокая четкость обнаруживаемых при ионно-плазменной обработке особенностей структуры отвержденных эпоксидных матриц обусловлена различиями в химическом составе и плотности макромолекулярной упаковки. Светлые участки изображения, устойчивые к обработке ионами, предлагается определить, как микродисперсную фазу, а темные участки – как дисперсную среду. Однако характер выявляемых структурных особенностей полимерных составов на основе эпоксидных олигомеров до сих пор не ясен. Строение отвержденных термореактивных полимеров представляет собой глобулярную структуру, но характер их распределения по размерам и форме глобул зависит от компонентов реакционной системы и условий отверждения. Несмотря на присутствие четких различий по характеристикам у полимерной смеси, эти свойства не являются классическими фазами. Это происходит из-за того, что застывание полимерной смеси сопровождается фазовым распадом, который не приводит к образованию фаз в силу резкого увеличения плотности смеси и снижения скорости диффузии. Следовательно, отвержденная термореактивная матрица является неравновесной, но стабильной коллоидно-дисперсной системой. На основании данных положений проведен анализ микроструктуры ПКМ марок

ВКУ-59 и ВПС-68.

С целью исследования торцевой и поперечной микроструктуры ПКМ марок ВКУ-59 и ВПС-68 были изготовлены микрошлифы исследуемых фрагментов. Проведено изучение микрошлифов разработанных угле- и стеклопластиков с использованием ионно-плазменного травления для изучения внутренней структуры. Эксперимент проводился в течение полутора часов. Для уменьшения эффекта зарядки на поверхности микрошлифов был нанесен проводящий слой (золото-палладий толщиной 5 нм) [108, 109] с использованием установки магнетронного напыления. Поверхность микрошлифов изучалась с помощью растрового электронного микроскопа при ускоряющем напряжении 15 кВ и токе пучка 20 пА, а также сканирующего электронного микроскопа. Получены изображения структуры образцов при увеличении от $\times 1000$ до $\times 20000$. Для исследования тонких поверхностных покрытий образцы обрабатывали ионно-плазменным методом. Во избежание накопления электричества на изоляционных образцах при их исследовании в сканирующем электронном микроскопе, на них было нанесено металлическое покрытие с использованием магнетронного распыления.

На рисунках 19 – 21 приведены изображения: общего вида структуры углепластика марки ВКУ-59 (рисунки 15 - 17), строения граничного слоя волокно-матрица (рисунок 18). На микрофотографиях четко видна структура волокна и связующего.

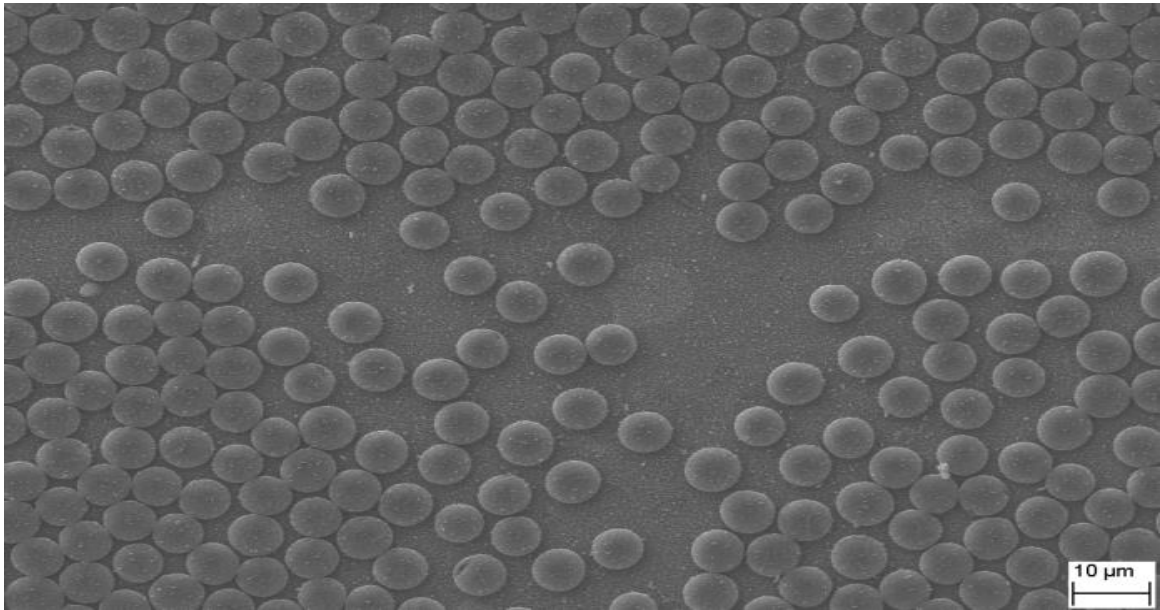


Рисунок 15 – Микроструктура углепластика марки ВКУ-59, общий вид, увеличение $\times 2000$

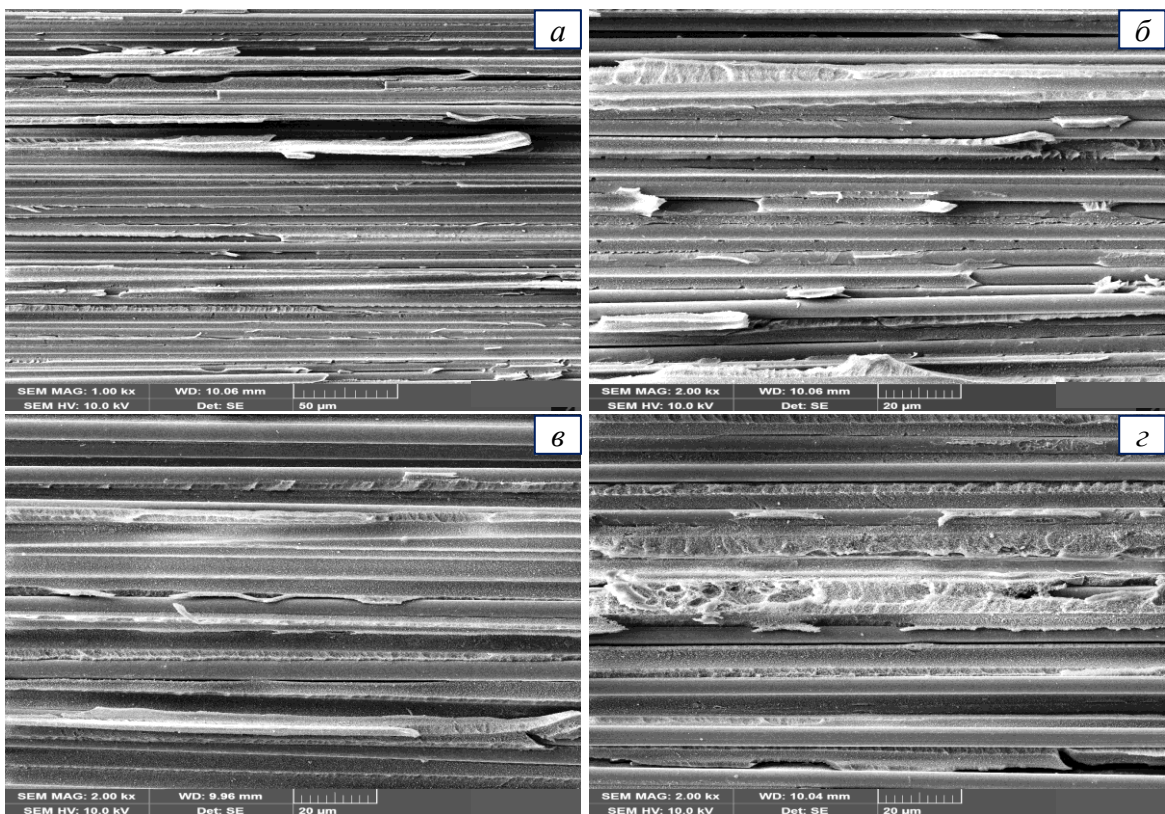


Рисунок 16 – Микроструктура поверхности углепластика марки ВКУ-59: а) $\times 1000$; б-г) $\times 2000$

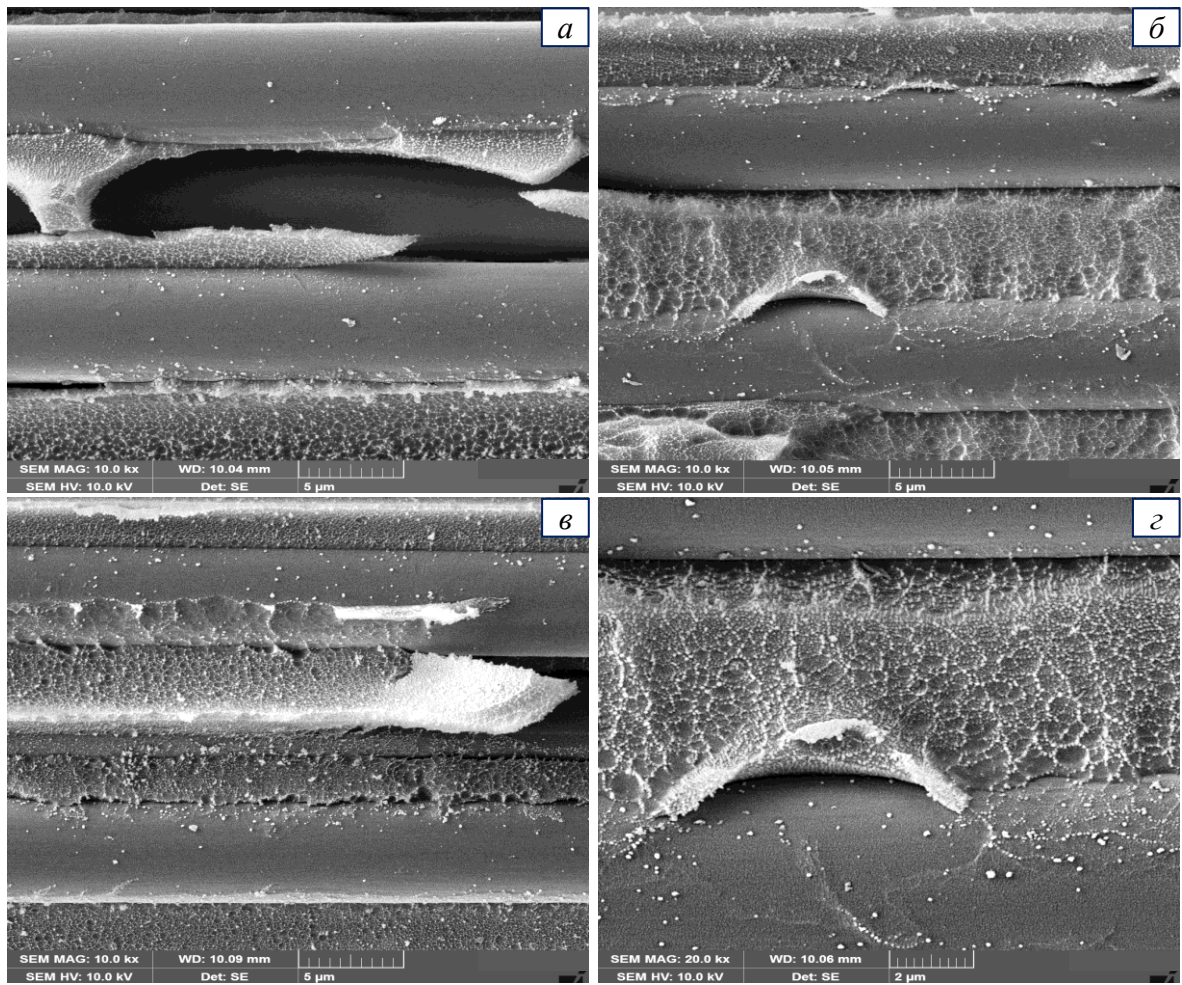


Рисунок 17 – Микроструктура поверхности углепластика марки ВКУ-59:
а, б) $\times 10000$; в) $\times 10000$; г) $\times 20000$

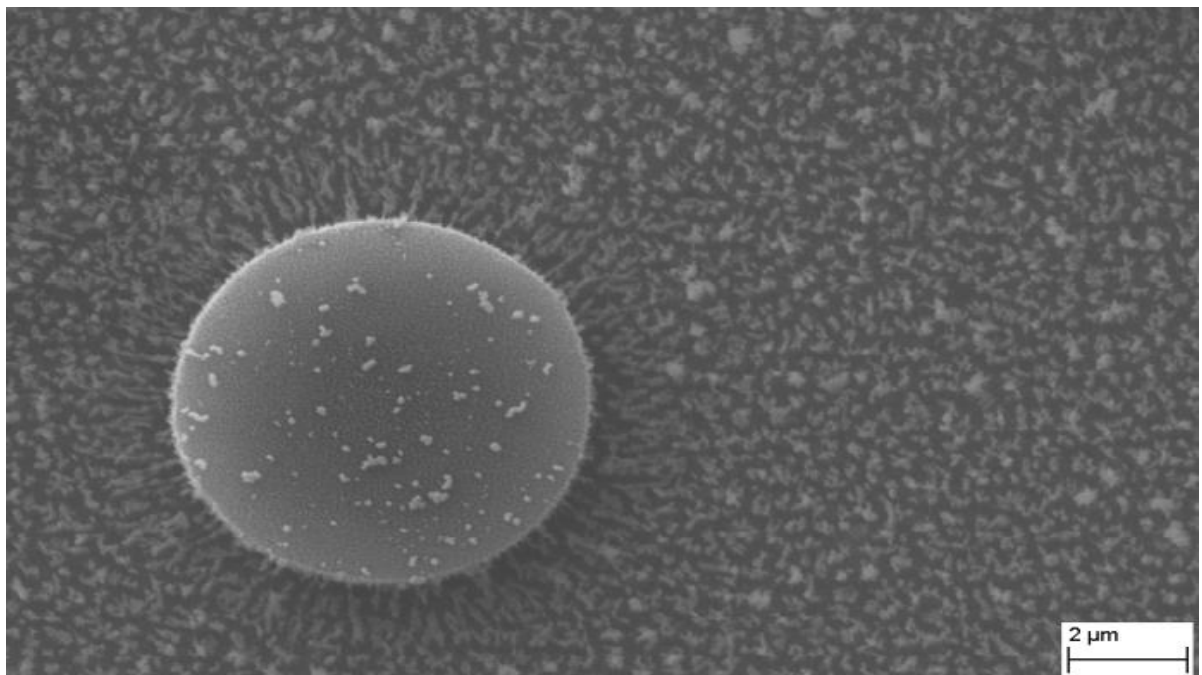


Рисунок 18 – Микроструктура углепластика марки ВКУ-59, строение граничного слоя волокно-матрица, увеличение $\times 15000$

Между моноволокном и связующим имеется четкая граница раздела, при этом структура приграничного слоя (~ 1 мкм) отличается от структуры связующего в массе (рисунок 18). Структура приграничного слоя ориентирована; она имеет разную толщину, которая, определяется поверхностной энергией моноволокна. Можно предположить, что отличие в структуре приграничного слоя объясняется взаимодействием связующего с поверхностью углеродного моноволокна [110].

На рисунках 23 – 26 приведены изображения: общего вида структуры стеклопластика марки ВПС-68 (рисунки 19 - 21), строения граничного слоя волокно-матрица (рисунок 22).

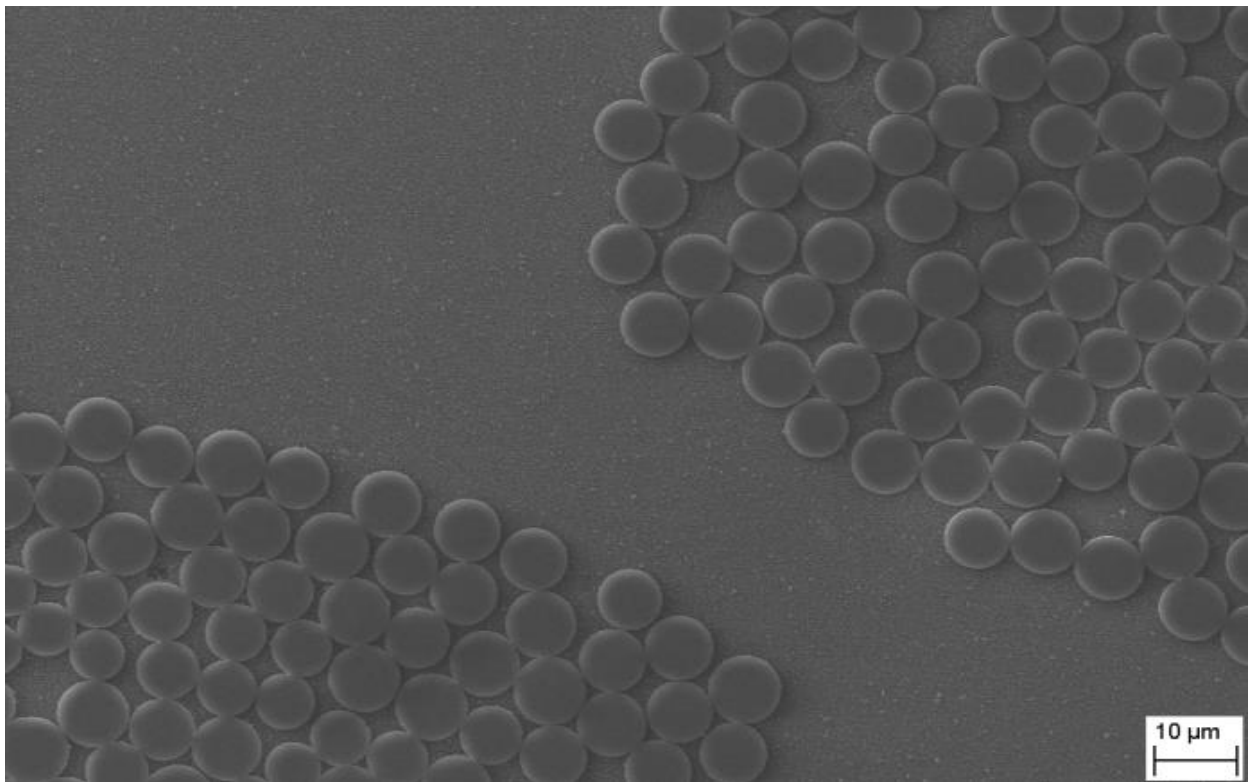


Рисунок 19 – Микроструктура стеклопластика марки ВПС-68, общий вид, увеличение $\times 2000$

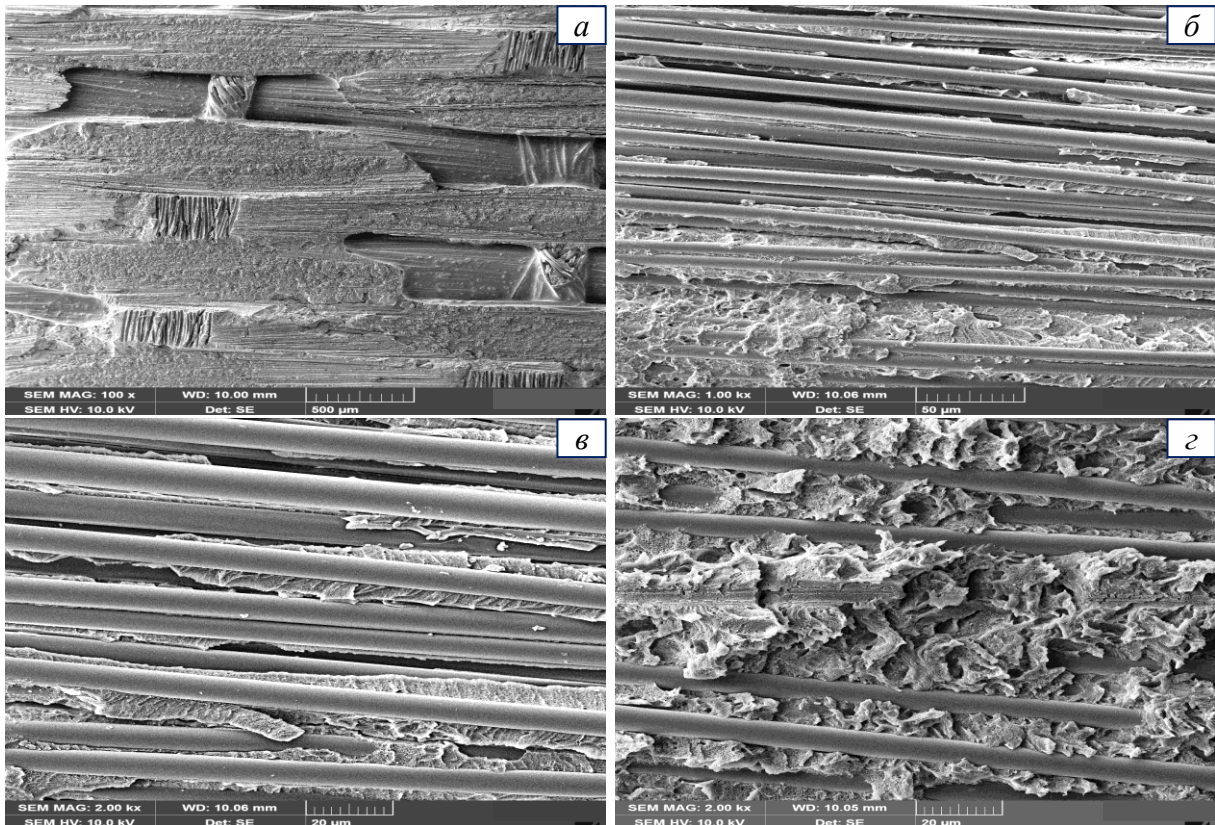


Рисунок 20 – Микроструктура поверхности стеклопластика марки ВПС-68:
а) x100; б) x1000; в,г) x2000

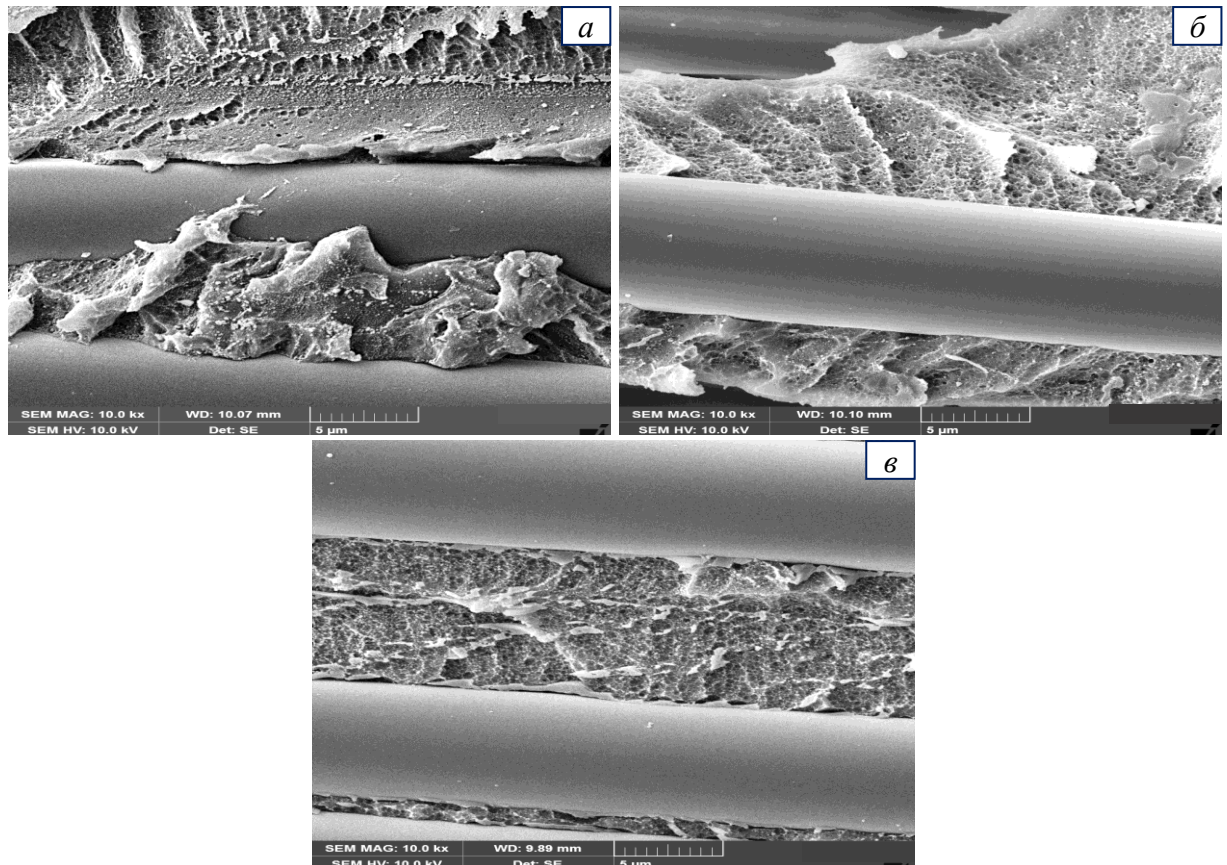


Рисунок 21 – Микроструктура поверхности стеклопластика ВПС-68, x10000

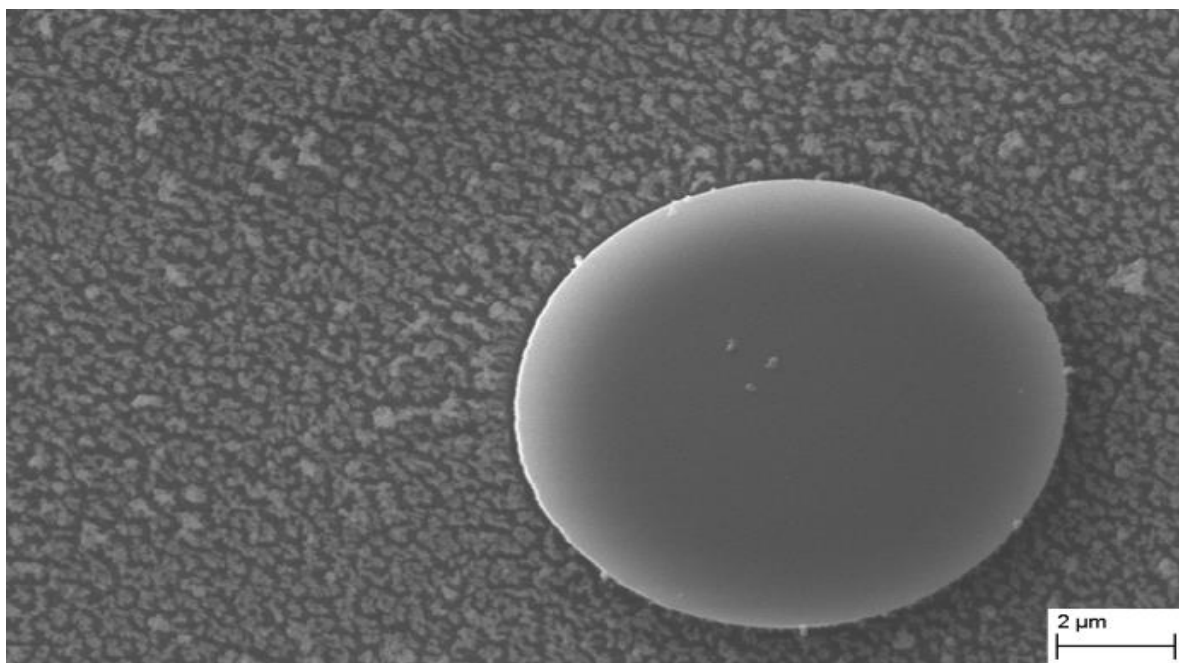


Рисунок 22 – Микроструктура стеклопластика марки ВПС-68, строение граничного слоя волокно-матрица, увеличение, $\times 15000$

Структура связующего ВСК-14-6, удаленного от поверхности угле- и стекловолокна, далее, чем на 1 мкм, равномерна. Исследования микроструктуры показали, что в ней полностью отсутствуют микродефекты (поры, воздушные включения и др.).

Значимым различием строения граничного слоя волокно-матрица в углепластике и стеклопластике является наличие выраженных радиально ориентированных образований микродисперсной фазы в граничном слое в углепластике.

На рисунке 23 приведено изображение микрогетерогенной структуры матрицы ВСК-14-6.

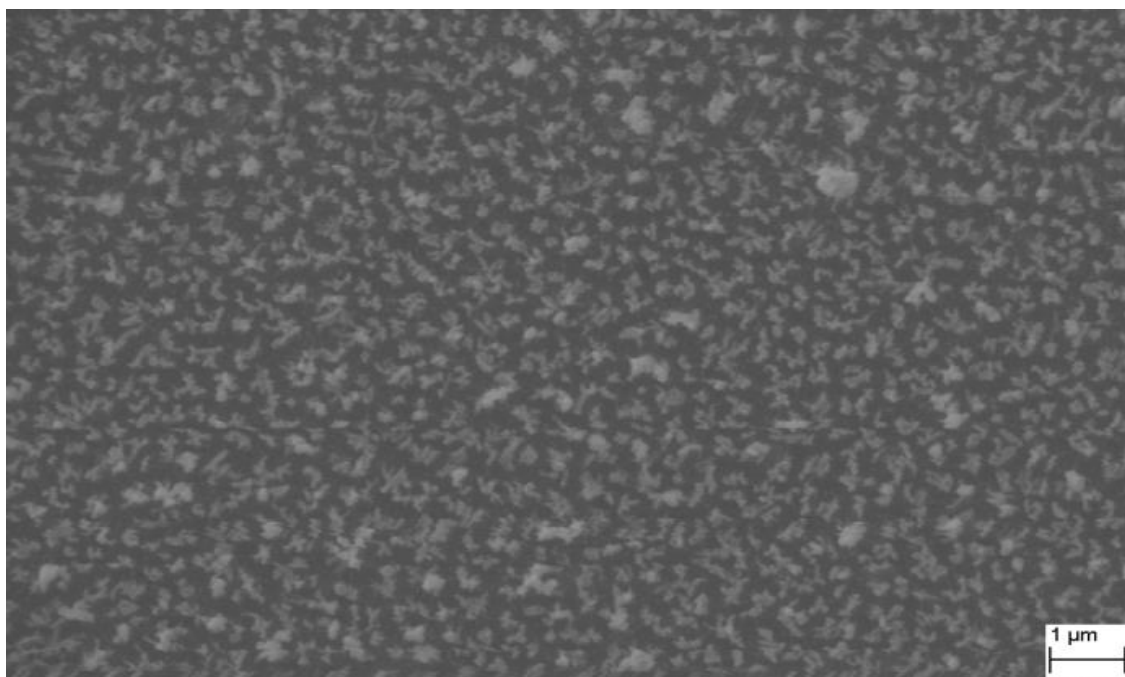


Рисунок 23– Микроструктура углепластика марки ВКУ-59 микроструктура полимерной матрицы, $\times 20000$

Как показано на рисунке 23, состав связующего представляет собой изотропную двухфазную структуру. На изображении светлые частицы представляют дисперсную фазу, в то время как темные частицы обозначают дисперсионную среду. Частицы дисперсной фазы сформированы из агрегатов более мелких первичных частиц неправильной формы. Неоднородности с большей яркостью соответствуют фазе, обогащенной полисульфоном, с меньшей – фазе, обогащенной эпоксидным олигомером. Дисперсные частицы с относительно высокой яркостью характеризуются большей плотностью пространственной сетки.

Ранее в данной работе было установлено, что клеевое связующее марки ВСК-14-6 обладает пониженными вязкостными характеристиками. Микроструктура углепластика, представленная на рисунках 15 и 19, подтверждает ранее сделанный вывод о высокой проникающей способности данного связующего и его способности заполнять пространство между моноволокнами наполнителя размером меньше 1 мкм, благодаря чему формируется композиционный материал, который обладает бездефектной структурой, высоким качеством с минимальным разбросом механических характеристик. Кроме этого,

за счет оптимальных реологических характеристик связующего марки ВСК-14-6 пониженной горючести, при температурах его переработки из клеевого препрега в ПКМ за счет равномерного распределения связующего в межволоконном пространстве наполнителя достигается эффект экранирования связующим моноволокон наполнителя, что также подтверждается результатами исследования микроструктуры материалов. Следствием этого является достижение пониженной горючести разработанных композиционных материалов - углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68.

3.5.2. Исследование горючести, дымообразования, токсичности

В условиях импортозамещения, а также для достижения весовой эффективности, обусловленной заменой традиционных металлических материалов на современные, разработчики авиационной техники все чаще обращаются к полимерным композиционным материалам (ПКМ) с заданным уровнем прочностных свойств.

Помимо повышенных прочностных характеристик, для материалов, применяемых в интерьере воздушных судов и других транспортных средств, имеют значение дополнительные требования к пожарной безопасности в пределах рабочих температур. Эти требования особенно актуальны в связи с заменой на полимерные композиционные материалы в нескольких узлах авиационных изделий металлических компонентов, обеспечивающих снижение массы, но в то же время являющихся горючими. При разработке нового поколения самолетов, в которых планировалось использовать больше полимерных композиционных материалов, стоит задача создания материалов с новым набором свойств, отвечающих жестким требованиям, включая пожаробезопасность (при использовании полимерных композиционных материалов в авиационном интерьере).

Одним из важнейших вопросов обеспечения пожаробезопасности является надёжность экранирования зон с высокой вероятностью возникновения пожара

(пожароопасных зон) от других элементов планера - пассажирских и багажно-грузовых отсеков.

В соответствии с требованиями федеральных (государственных) авиационных норм, все декоративно-отделочные и конструкционные материалы, используемые во внутренней отделке пассажирских салонов и багажно-грузовых отсеков, должны соответствовать предъявляемым требованиям по ограничению горючести. В Российской Федерации в настоящее время действуют как международные Авиационные правила (АП) [75], установленные Международным авиационным комитетом, так и Нормы летной годности (НЛГ), введенные Федеральным агентством воздушного транспорта (Росавиация). Тексты авиационных норм АП и НЛГ и предъявляемые в них требования практически идентичны.

Предъявляемые к материалам требования в части пожарной безопасности различаются как в зависимости от типа авиационной техники (вертолеты, самолеты, аэростаты), и ее категории (легкая, транспортная, очень легкая, беспилотная), так и от функционального назначения материала. Наиболее жесткие требования в части пожарной безопасности предъявляются к материалам, используемым в пассажирских салонах больших (транспортных) самолетов – в АП-25 и НЛГ 25. Кроме того, авиастроительные корпорации вправе к применяемым в конструкциях их авиационной техники материалам устанавливать свои, более жесткие, или дополнительные требования [110-112].

В соответствии с требованиями авиационных норм пункт 25.853(a) параграфа 25.853 «Внутренняя отделка кабин» и пункт 25.855(d) параграфа 25.855 «Грузовые и багажные отсеки», все используемые материалы должны удовлетворять применимым к ним критериям испытаний, предписанным в части I Приложения F указанных норм [75]. Соответствующие методы испытаний приведены и в ГОСТ Р 57924-2017. Вышеперечисленные документы предусматривают несколько вариантов методов испытаний. Для конструкционных материалов, в зависимости от их функционального назначения, могут использоваться вертикальный метод испытания с экспозицией пламенем

горелки в течение 60 секунд (пункт (а)(1)(i) части I), 12 секунд (пункт (а)(1)(ii) части I), а также метод испытаний под углом 45 градусов к горизонту (пункты (а)(2)(ii) и (iii) части I). В данной работе были выполнены исследования с использованием вертикального метода испытаний и под углом 45 градусов к горизонту с экспозицией пламенем горелки в течение 60 секунд.

Материалы считаются соответствующими требованиям авиационных норм, если при 60 секундной экспозиции образца пламенем горелки, продолжительность остаточного горения не превышает 15 секунд, длина прогорания не превышает 152 мм (6 дюймов), а продолжительность горения каплей не превышает 3 секунды.

По разработанному режиму отверждения методом автоклавного формования были изготовлены образцы углепластика марки ВКУ-59, а также образцы стеклопластика марки ВПС-68 и проведено исследование их свойств на соответствие требованиям АП-25 Приложение F часть I п. 853 (а)(i) по горючести (таблица 20).

Таблица 20 – Результаты испытаний углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на горючесть в вертикальном положении

Марки материала	Толщина образца, мм	Продолжительность экспозиции пламенем горелки, с	Продолжительность остаточного горения (среднее), с	Длина обугливания (среднее), мм	Продолжительность горения каплей, с
ВКУ-59	1,11	60	0	56,3	нет
	2,10		2,3	59,0	нет
	3,99		1,0	39,0	нет
ВПС-68	1,23	60	0	72,0	нет
	2,28		1,6	53,3	нет
	4,18		0,6	46,3	нет
АП-25 Приложение F часть I (а)(1)(i), не более			15	152	3

Как видно из таблицы 20, углепластик марки ВКУ-59 и стеклопластик марки ВПС-68 на основе клевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 соответствует требованиям АП-25 Приложение F часть I п. 25.853 (а) по горючести.

Одним из видов пожарной опасности, присущих полимерным материалам и ПКМ в том числе, является способность выделять дым. Образующиеся в процессе термоокислительной деструкции мелкодисперсные конденсированные частицы приводят к снижению видимости, что затрудняет ориентацию в пространстве и способствует возникновению паники. Кроме того, такие частицы сорбируют токсичные соединения, попадание которых в дыхательные пути человека наносит вред его здоровью и может привести к преждевременной смерти.

Поэтому определение данного показателя пожарной опасности для полимерных материалов должно быть неотъемлемой частью при проектировании конструкций (деталей), изготавливаемых из ПКМ, которые планируются к применению во внутренней части самолета.

Как уже было отмечено выше, ПКМ планируемые к применению в самолете в качестве отделки стен, потолка, перегородок пассажирской кабины, должны соответствовать требованиям авиационных норм по дымообразованию, при этом удельная оптическая плотность дыма за 4 минуты не должна превышать 200 единиц. Однако это требование, изложенное в федеральных авиационных нормах, относится только к панелям стен и потолка в месте постоянного пребывания пассажиров (пассажирская кабина с числом мест не менее 20). Данные требования не относятся к местам временного пребывания (туалеты, коридоры, кухни), а также в кабине пилотов, грузовому и багажному отсекам. Более того, высокая дымообразующая способность материалов, из которых изготовлены панели багажно-грузовых отсеков, может способствовать более быстрому срабатыванию датчиков дыма и быстрее информировать экипаж о возникновении пожара в местах, где обычно во время полета отсутствуют люди.

Эти требования федеральных авиационных норм не относятся и материалам другого функционального назначения, например, к панелям пола. Это объясняется тем, что панели пола распложены в нижней части кабины, поэтому при проникновении открытого пламени в пассажирскую кабину в случае летного происшествия, падающий тепловой поток на нижнюю часть кабины будет

значительно ниже, чем на стены и потолок. Кроме того, панели пола закрыты декоративным покрытием (линолеум, ковер, антискользящее покрытие) и по большей части защищены от пламени другими предметами (кресла). Поэтому более целесообразно определять дымообразующую способность не панелей пола, а именно декоративных покрытий. Именно такой подход и реализован в авиационных нормах корпораций [112].

Тем не менее, для получения информации о потенциальной опасности материалов ВКУ-59 и ВПС-68 были проведены исследования по определению дымообразующей способности, полученные результаты представлены в таблице 21.

Таблица 21 – Результаты испытаний углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на основе клеевого связующего на дымообразующую способность

Марки материала	Толщина образца, мм	Режим испытания	Удельная оптическая плотность дыма			
			D_2	D_4	$D_{\text{макс}}$	
ВКУ-59	0,41	Горение	125	129	130	
		Пиролиз	113	172	190	
	0,83	Горение	250	257	258	
		Пиролиз	238	264	281	
	1,10	Горение	333	343	344	
		Пиролиз	208	312	319	
	2,07	Горение	373	403	405	
		Пиролиз	81	287	303	
	4,39	Горение	238	626	655	
		Пиролиз	3	166	445	
	ВПС-68	0,38	Горение	64	93	98
			Пиролиз	74	96	103
0,79		Горение	147	180	182	
		Пиролиз	130	162	162	
1,18		Горение	438	450	451	
		Пиролиз	262	343	345	
2,22		Горение	609	639	639	
		Пиролиз	138	461	473	
4,20		Горение	138	461	473	
		Пиролиз	338	818	639	
АП-25 Приложение F часть V (a)(1)(i), не более				200		

Как видно из таблицы 21, углепластик марки ВКУ-59 толщиной 0,41 мм и стеклопластик марки ВПС 68 с толщиной до 0,79 мм, изготовленные на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6, имеют оптическую плотность дыма меньше предельно допустимого значения 200 единиц. Испытанные образцы ПКМ на основе этого связующего бóльших толщин имеют оптическую плотность дыма выше 200.

Панели пола в самолетах имеют большой объем: в магистральных самолетах с числом мест от 200 их площадь превышает 100 м², с числом мест от 24 до 80 составляет 14–45 м² [92]. Применение полимерных композиционных материалов при изготовлении панелей пола воздушных судов позволяет снизить вес изделий и значительно увеличить их долговечность, при этом сохраняя прочность и жесткость. Прессовым методом формования были изготовлены образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола из углепластика марки ВКУ-59 на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ.65, а также образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола из стеклопластика марки ВПС-68 на основе клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).55. Ниже представлены результаты исследований по пожарной безопасности конструктивных элементов (трехслойные сотовые панели), изготовленные с обшивками из указанных ПКМ (таблица 22, 23).

Таблица 22 – Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на горючесть в вертикальном положении

Материал	Толщина образца, мм	Продолжительность экспозиции пламенем горелки, с	Продолжительность остаточного горения, с	Длина обугливания, мм	Продолжительность горения капель, с
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	10,28	60	0	9	0 (нет капель)
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,06	60	0	84	0 (нет капель)
АП-25 Приложение F часть I (a)(1)(i), не более			15	152	3

Таблица 23 – Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на горючесть под углом 45° к горизонту

Материал	Толщина образца, мм	Продолжительность экспозиции пламенем горелки, с	Продолжительность остаточного горения, с	Продолжительность остаточного тления, с
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	9,94	30	2	0
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,78	30	0	0
АП-25 Приложение F часть I (a)(1)(i), не более			15	3

Установлено, что образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из клеевых препрегов угле- и стеклопластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 отвечают требованиям отечественных и зарубежных федеральных авиационных норм [112] и корпоративных стандартов по характеристикам горючести (Приложение F часть I (a)(1)(i)).

Проведены испытания образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола на соответствие требованиям АП-25 Приложение F часть V по дымообразующей способности с целью определения возможности применения данных материалов во внутренней части самолета (таблица 24).

Таблица 24 – Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на дымообразующую способность

Наименование материала	Толщина, мм	Режим испытания	Показатель удельной оптической плотности дыма		
			Д ₂	Д ₄	Д _{макс}
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	10,36	Горение	159	199	205
	10,38	Пиролиз	137	160	171
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,49	Горение	201	233	236
	10,54	Пиролиз	129	156	177
Предельно допустимые значения:					
АП-25 Приложение F часть V, не более (для панелей стен и потолка пассажирской кабины)		Горение	-	200	-
FAR/CS-25.853 Appl.F part V, max (для панелей		Горение	-	200	-

стен и потолка пассажирской кабины)				
ABD 0031 (Airbus) (для материалов пола пассажирской кабины)	Горение	-	250	-

Из данных, представленных в таблице 24, следует, что образцы трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 без декоративного покрытия имеют оптическую плотность дыма за 4 минуты не более 200 единиц. Оптическая плотность дыма трехслойной сотовой панели с обшивками из ВПС 68 имеет оптическую плотность дыма больше 200.

Как отмечено в учебном пособии [113], в условиях пожара опасность для человека определяется следующими факторами: воздействие высоких температур, распространение пламени по поверхности материалов, снижение видимости из-за выделения дыма и образование токсичных продуктов горения. Увеличение доли применения ПКМ во внутренней части самолета за последние годы существенно увеличило вероятность отравления пассажиров продуктами горения данных материалов. В связи с этим важной задачей для обеспечения пожарной безопасности ПКМ и конструкций на их основе является определение токсичности продуктов горения данных материалов.

Так как в федеральных (государственных) авиационных нормах требования по токсичности продуктов горения не предъявляются, то каждая авиастроительная корпорация сама принимает решение, будут ли вводиться на применяемые в их авиационной технике материалы требования по токсичности, а также тип метода испытания и предельно допустимые значения.

Так как в процессе термического воздействия на полимерный композиционный материал выделяется широкий спектр веществ, то в мировой практике принято определять некоторый ограниченный перечень газов, максимально опасных для человеческого организма. Разными стандартами во внимание принимается различное количество газов – например, военно-морской стандарт NATO STANAG 4602 подразумевает измерение концентраций 19 различных газов, а при определении токсичности по ГОСТ 12.1.044 89 производится измерение концентраций всего двух газов (СО и СО₂), некоторые

ограничиваются измерением концентраций трех газов (CO, CO₂, HCl или CO, CO₂, O₂).

В авиастроительных корпорациях Boeing и Airbus решили ограничиться измерением шести наиболее распространенных в продуктах горения неорганических токсичных газов, таких как: NO_x (NO+NO₂), HCN, CO, HCl, SO₂, HF. Каждая из корпораций установила свои предельно допустимые значения концентраций газов, с которыми допускается применение материалов. Измерение концентраций газов производится в условиях проведения испытаний на дымообразование – отбор газов производится непосредственно сразу после окончания теста.

Необходимо отметить, что установленные авиационными корпорациями предельно допустимые значения концентраций напрямую не связаны со среднесмертельными (вызывающими смертность 50% лабораторных животных) концентрациями, предельно допустимыми концентрациями газов в воздухе пассажирских салонов самолетов (параграф 25.831 авиационных норм) или предельно допустимыми концентрациями в воздухе жилой застройки (например, согласно СанПиН 1.2.3685).

Учитывая пожелания отечественных авиастроителей – возможных потребителей разработанных материалов, были проведены испытания образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 по определению токсичности продуктов горения (таблица 25). Для удобства сопоставления все значения приведены как в единицах измерения мг/м³, так и концентрациях млн⁻¹ (ppm). В этой же таблице приведены среднесмертельные концентрации согласно зарубежным стандартам ASTM и ISO, установленные предельные концентрации

Таблица 25 – Результаты испытаний образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 на токсичность

Наименование	Средняя толщина, мм	Режим испытания	Ед. изм.	Количество продуктов горения					
				NO _x	HCN	CO	HCl	SO ₂	HF
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	10,16	Горение	мг/м ³	1	0,1	250	0,5	1	0,5
			ppm	0,49	0,08	200	0,33	0,37	0,59
		Пиролиз	мг/м ³	1	0,1	100	0,5	1	0,5
			ppm	0,49	0,08	80	0,33	0,37	0,59
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	10,16	Горение	мг/м ³	1	0,1	300	0,5	1	0,5
			ppm	0,49	0,08	240	0,33	0,37	0,59
		Пиролиз	мг/м ³	1	0,1	150	0,5	1	0,5
			ppm	0,49	0,08	120	0,33	0,37	0,59
СБ-21 (ПАО «Яковлев»)		Горение	мг/м ³	13	13	200	1	1	1,5
			ppm	6,3	10,8	160	0,61	0,35	1,68
ABD 0031 (Airbus)		Горение	мг/м ³	205	181	1250	244	286	89
			ppm	100	150	1000	150	100	100
SMP 800-C (Bombardier)		Горение	мг/м ³	205	121	4375	815	286	89
			ppm	100	100	3500	500	100	100
BSS 7239 (Boeing)		Горение	мг/м ³	205	181	4375	815	286	179
			ppm	100	150	3500	500	100	200
ASTM E1678		Горение	мг/м ³	-	181	-	5666	-	-
			ppm	-	150	-	3700	-	-
ISO 13344		Горение	мг/м ³	350	199	7120	6200	4000	2590
			ppm	170	165	5700	3800	1400	2900

По полученным в процессе исследований результатам по токсичности можно сделать следующий вывод, что конструкции панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 полностью соответствуют международным стандартам, которые могут быть использованы в авиастроении. Вместе с тем установлено, что уровень содержания угарного газа (CO) в режиме горения превышает пороговый показатель, который предъявляет корпорация ПАО «Яковлев» к своим изделиям.

В связи с тем, что разработанные материалы не в полной мере соответствуют требованиям СБ-21 (ПАО «Яковлев»), изучение вопроса предельно допустимой концентрации угарного газа CO на человека представляло дополнительный интерес.

Оксись углерода относится к ядовитым газам без запаха на основании данных, изложенных в справочнике [115]. В таблице 26 приведена информация из данного справочника о симптомах отравления угарным газом (окисью углерода) на человека. В этой же таблице для сравнения представлены требования ПАО «Яковлев» и результаты оценки токсичности многослойных панелей из стеклопластика и углепластика.

Таблица 26 – Сравнительная характеристика симптомов отравления при длительном воздействии угарным газом СО

Наименование	СО, мг/м ³	Длительность воздействия	Симптомы отравления
Данные из справочника	80	8 час	Симптомов отравления нет
	110	6,5 час	Симптомов отравления нет
	220	2 – 3 час	Легкая боль в области лба
	230	6 час	Боль в области лба, ощущение давления на лоб, быстро исчезающее на свежем воздухе. Расширение кожных кровеносных сосудов
	230 – 340	5 – 6 час	Головная боль. Головокружение
	440 – 460	2 час	Боли в области лба и затылка
	800 – 1000	20 – 30 мин	Головная боль, мышечная слабость, тошнота
	1350	33 мин – 1,5 час	Сердцебиение, легкое пошатывание, одышка при мышечной работе
	1760	20 мин	Головная боль, головокружение, тошнота
	3520	5 – 10 мин	Головная боль, головокружение
	7040	1 – 2 мин	Головная боль, головокружение
СБ-21 (ПАО «Яковлев»)	200	90 секунд	
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из углепластика ВКУ-59	250		
Трехслойная сотовая панель с обшивкой из стеклопластика ВПС-68	300		

Продолжительность эвакуации из самолета в случае летного происшествия в соответствии с требованиями авиационных норм не должна превышать 1,5 минуты (90 секунд). За этот период времени даже при концентрации угарного

газа 7000 мг/м^3 у людей не происходит потери сознания и не теряется возможность передвижения.

В случае возникновения летного происшествия во время полета, допустимая в обычных эксплуатационных условиях концентрация угарного газа – 1 часть на 20000 частей воздуха (50 млн^{-1}) обеспечивается за счет вентиляции, и со снижением концентрации СО с 300 мг/м^3 (240 млн^{-1}) до 50 млн^{-1} происходит всего за счет 5-кратного обмена воздуха.

В требованиях ПАО «Яковлев» предельно допустимые концентрации токсичных газов, по сравнению с аналогичными нормами зарубежных авиастроителей занижены в 5 – 800 раз, а по сравнению с переносимыми без дальнейшего вреда концентрациями – более чем в 35 раз (для СО), и более чем в 10 – 100 раз для других газов.

По результатам испытаний углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68, а также сотовых конструкций на их основе на горючесть установлено полное соответствие требованиям АП-25 Приложение F часть I п.(а)(1)(i).

Из результатов испытаний стекло-, углепластика и трехслойной панели на дымообразование установлено, что данные материалы и конструктивный элемент на их основе обладают высокой дымообразующей способностью, однако согласно требованиям государственных авиационных норм, это не является препятствием для применения трехслойных сотовых панелей данного состава в качестве панелей пола в пассажирской кабине, а также панелей пола, стен и потолка в грузовых и багажных отсеках.

Токсичность продуктов горения полимерных материалов в настоящее время в государственных авиационных нормах не регламентируется. Результаты испытаний на токсичность продуктов выделяемых в процессе горения трехслойных сотовых конструкций показали соответствие требованиям, установленным в ведущих мировых авиастроительных корпорациях (Boeing, Airbus).

3.5.3. Исследование характера изменения свойств полимерных композиционных материалов при воздействии внешних факторов

Необходимо оценивать пригодность и долговечность материалов, применяемых при создании деталей, поломка которых может негативно отразиться на безопасности. Это требование содержится в авиационных нормах АП-25 п.25.603(с) [75] и подразумевает учёт воздействия окружающих условий во время эксплуатации, включая температуру и влажность.

Климатические факторы, такие как температура и влажность, оказывают значительное воздействие на устойчивость материалов. При совокупном воздействии они инициируют процессы старения и способствуют химическим изменениям, что в конечном итоге может привести к снижению прочности материалов за время работы изделий в течение 25-30 лет [116]. Проблема сохранения свойств ПКМ возникает наиболее остро при использовании техники в регионах с суровыми погодными условиями, такими как тропический климат.

Осуществление климатических испытаний помогает оценить соответствие материалов требованиям производства изделий и обеспечить контроль за характеристиками получаемых материалов [117 - 119].

3.5.3.1. Исследование характера изменения свойств углепластика марки ВКУ-59 при воздействии внешних факторов

Исследование свойств углепластика ВКУ-59 производилось на образцах, отформованных в автоклаве по выбранному в разделе 3.3 режиму.

Для определения устойчивости углепластика марки ВКУ-59 к воздействию внешних факторов проведены исследования прочности образцов из углепластика с незащищенными торцами со схемой армирования $[0/-45/90/+45]_{4s}$ при изгибе по ГОСТ 56810-2015 и сжатии по ГОСТ 25.602-80 после воздействия факторов: условий камеры тропического климата, тепловлажностного и теплового старения, воды, влаги и химических сред (масла ИПМ-10 и топлива ТС-1). Экспозиция с незащищенными торцами позволяет в лабораторных условиях симитировать локальное разрушение ПКМ и определить тем самым остаточный уровень

прочности образца из ПКМ при экспозиции в заданных условиях [116]. Результаты испытаний прочностных характеристик материалов после воздействия перечисленных внешних факторов в сравнении с исходными характеристиками (средние значения) приведены на рисунках 24 – 27.

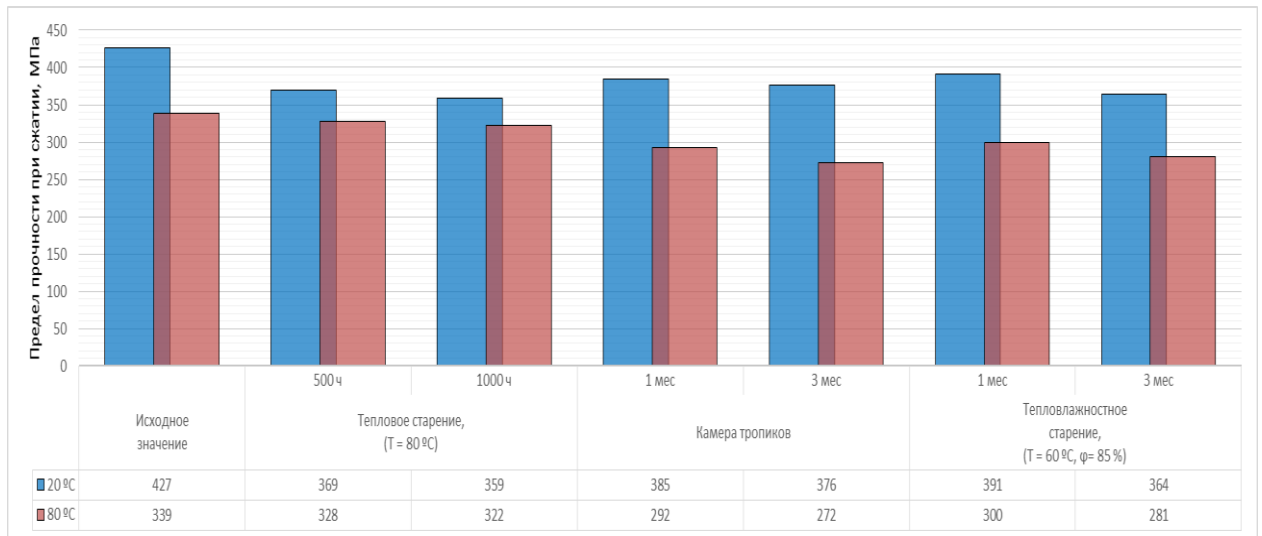


Рисунок 24 – Характер изменения прочности при сжатии углепластика марки ВКУ-59 после воздействия внешних факторов

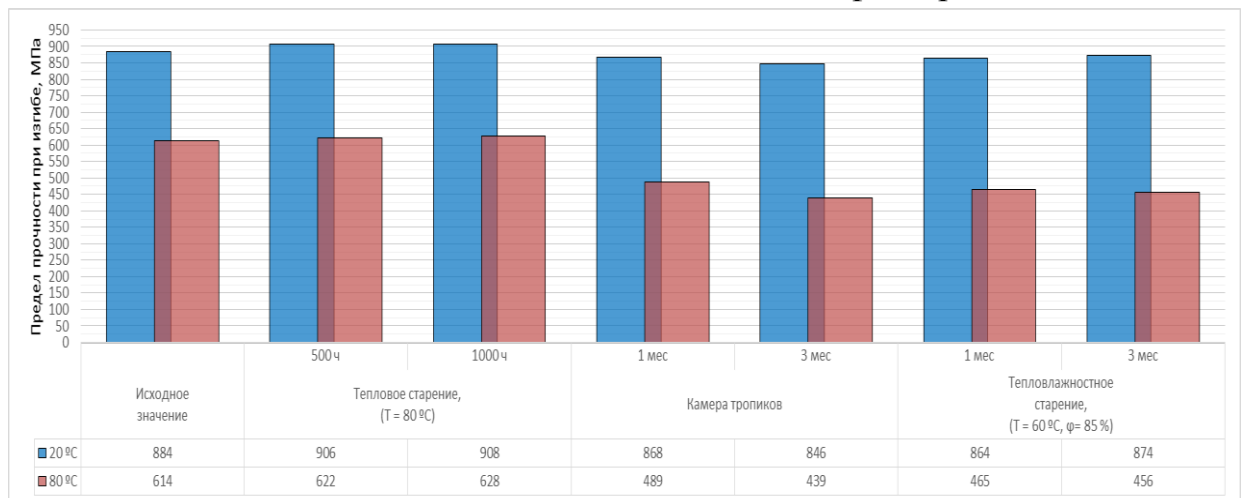


Рисунок 25 – Характер изменения прочности при изгибе углепластика марки ВКУ-59 после воздействия внешних факторов

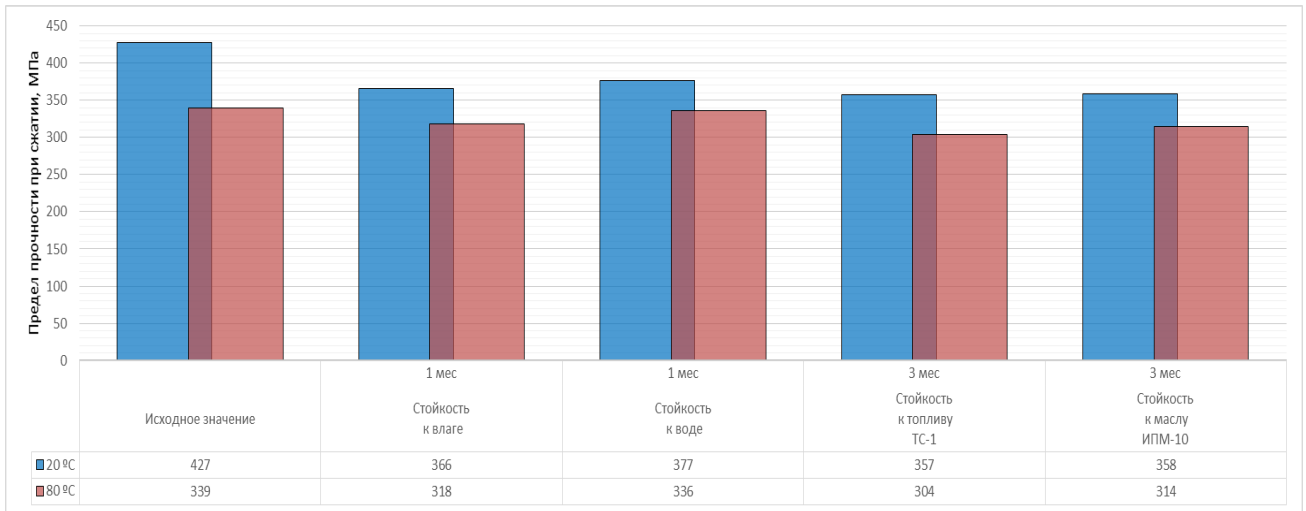


Рисунок 26 – Характер изменения прочности при сжатии углепластика марки ВКУ-59 после экспозиции в агрессивных средах

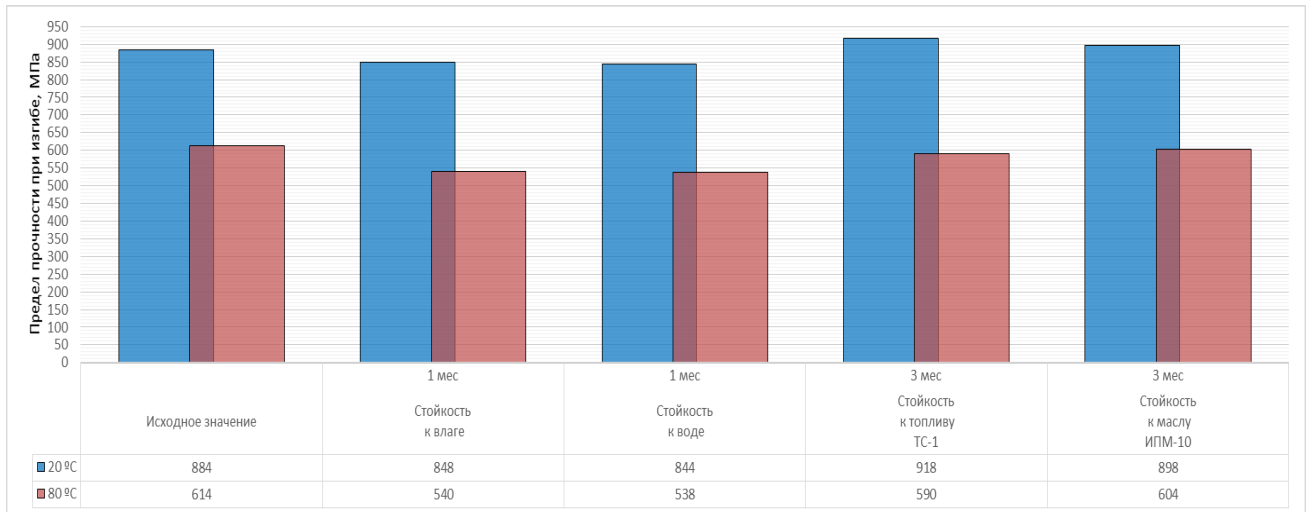


Рисунок 27 – Характер изменения прочности при изгибе углепластика марки ВКУ-59 после экспозиции в агрессивных средах

Таблица 27 – Уровень сохранения механических свойств углепластика марки ВКУ-59 после воздействия внешних факторов

Наименование характеристики, НД	Фактор воздействия	Время воздействия	Уровень сохранения механических характеристик, %, при температуре испытаний, °C	
			20	80
1	2	3	4	5
Прочность при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$, % ГОСТ 33519-2015	Тепловое старение (T=80°C)	500 ч	86,4	96,7
		1000 ч	84,1	95,0
	Камера тропиков	1 мес	90,2	86,1
		3 мес	88,0	80,2
	Тепловлажностное старение (T=60°C, φ=85%)	1 мес	91,6	88,5
		3 мес	85,2	82,9

1	2	3	4	5
	Водостойкость	1 мес	88,3	99,1
	Влагостойкость $T=(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ и $\varphi=98\%$	1 мес	85,7	93,8
	Топливо ТС-1	3 мес	83,6	89,7
	Масло ИПМ-10	3 мес	83,8	92,6
Предел прочности при поперечном изгибе $\sigma_{в}^H$, % ГОСТ 56810-2015	Тепловое старение ($T=80^{\circ}\text{C}$)	500 ч	102,5	101,3
		1000 ч	102,7	102,3
	Камера тропиков	1 мес	98,2	95,7
		3 мес	79,6	71,5
	Тепловлажностное старение ($T=60^{\circ}\text{C}$, $\varphi=85\%$)	1 мес	97,7	75,7
		3 мес	98,9	74,3
	Водостойкость	1 мес	95,5	87,6
	Влагостойкость $T=(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ и $\varphi=98\%$	1 мес	95,9	87,9
	Топливо ТС-1	3 мес	103,8	96,1
	Масло ИПМ-10	3 мес	101,6	98,4

Как видно из данных, представленных в таблице 27, углепластик марки ВКУ-59 со схемой армирования $[0/-45/90/+45]_{4s}$ после воздействия внешних факторов демонстрирует высокий уровень сохранения упруго-прочностных свойств при изгибе (при 20°C в интервале 79,6 – 103,8 %, при 80°C в интервале 71,5 – 102,3 %) и сжатии (при 20°C в интервале 83,6 – 91,6 %, при 80°C в интервале 80,2 – 99,1 %) относительно исходных значений. Отмечено, что экспозиция образцов углепластика марки ВКУ-59 с незащищенными торцами в влагонасыщенных условиях (камера тропического климата, водо- и влагостойкость) приводит к снижению уровня прочностных показателей. Данное снижение прочности образцов из ПКМ вероятно обусловлено сорбцией воды в межволоконном пространстве материала.

Высокий уровень сохранения прочностных свойств углепластика в диапазоне рабочих температур свидетельствует о стойкости углепластика марки ВКУ-59 к внешним воздействующим факторам.

Также были исследованы клеящие свойства клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ.65 с увеличенным содержанием клеевого связующего ВСК-14-6. По разработанному многоступенчатому режиму отверждения связующего были изготовлены образцы клеевых соединений углепластика марки ВКУ-59 из

клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ.65 и проведены исследования характера изменения механических характеристик клеевых соединений (прочности при сдвиге и прочности при отрыве обшивки от сотового заполнителя) в исходном состоянии и после воздействия климатических факторов. Результаты испытаний, а также уровень сохранения характеристик представлены на рисунках 28 – 29 и в таблице 28.

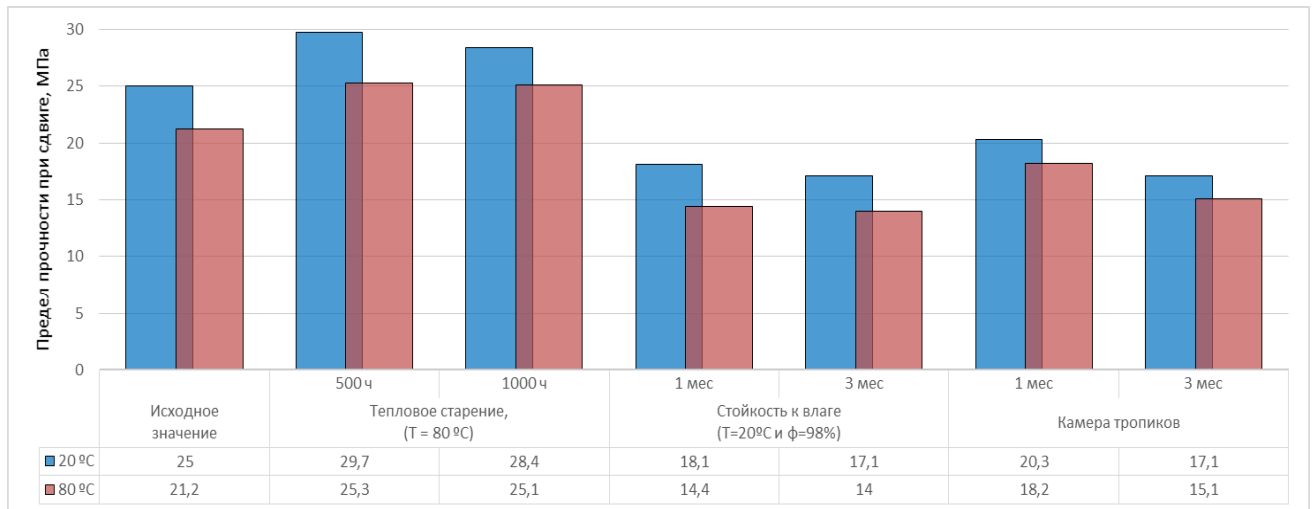


Рисунок 28 – Характер изменения прочности при сдвиге клеевых соединений углепластика марки ВКУ-59 после воздействия внешних факторов

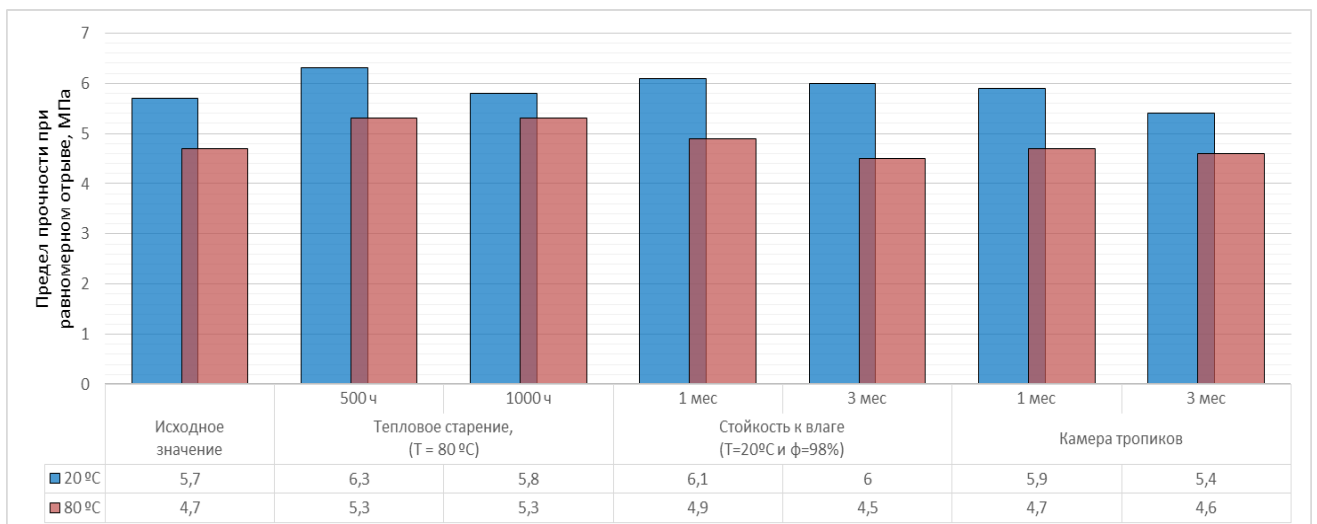


Рисунок 29 – Характер изменения прочности при равномерном отрыве обшивки из углепластика марки ВКУ-59 от сотового заполнителя после воздействия внешних факторов

Таблица 28 – Характер изменения механических свойств клеевых соединений углепластика ВКУ-59

Наименование характеристики, НД	Фактор воздействия	Длительность воздействия	Характер изменения механических характеристик, %, при температуре испытаний, °С	
			20	80
Прочность при сдвиге, τ , МПа ГОСТ Р 57834-2017	Тепловое старение (T=80°C)	500 ч	118,8	119,3
		1000 ч	113,6	118,4
	Камера тропиков	1 мес	81,2	85,8
		3 мес	68,4	71,2
	Влагостойкость T=(20 ± 2)°C и ϕ =98%	1 мес	72,4	67,9
		3 мес	68,4	66,0
Предел прочности при отрыве обшивки от сотового заполнителя, $\sigma_{отр}$, МПа ГОСТ 14760-69	Тепловое старение (T=80°C)	500 ч	110,5	112,7
		1000 ч	101,7	112,7
	Камера тропиков	1 мес	103,5	100,0
		3 мес	94,7	97,9
	Влагостойкость T=(20 ± 2)°C и ϕ =98%	1 мес	107,0	104,2
		3 мес	105,2	95,7

Как видно из таблицы 28, клеевые соединения углепластика ВКУ-59 из клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ.65 в исходном состоянии и после воздействия климатических факторов демонстрируют высокий уровень сохранения прочностных характеристик. Прочность при сдвиге при 20 °С в интервале 68,4 – 118,8 %, при 80 °С в интервале 66,0 – 119,3 %. Прочность при отрыве обшивки от сотового заполнителя при 20 °С в интервале 94,7 – 110,5 %, при 80 °С в интервале 97,9 – 112,7 %.

Необходимо отметить, что при испытании образцов клеевых соединений при равномерном отрыве обшивки из углепластика марки ВКУ-59 от сотового заполнителя констатирован характер разрушения по сотовому заполнителю, что свидетельствует о том, что прочность клеевого соединения выше прочности сотового заполнителя из фольги АМг2Н, яч. 2,5мм.

По результатам исследований образцов углепластика, изготовленных на основе клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ, установлено, что выявленные оптимальные условия переработки клеевого связующего марки ВСК-14-6 в клеевой препрег, а также препрега в углепластик позволяют реализовать комплекс

физико-механических свойств с высоким сохранением после воздействия внешних факторов, имитирующих эксплуатационные. Углепластик марки ВКУ-59 может быть рекомендован для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе слоистой и сотовой конструкции, работающих в интервале температур от минус 60 до плюс 80 °С.

3.5.3.2. Исследование характера изменения свойств стеклопластика марки ВПС-68 при воздействии внешних факторов

Исследование свойств стеклопластика ВПС-68 производилось на образцах, отформованных в автоклаве по выбранному в разделе 3.3 режиму.

Для определения устойчивости стеклопластика марки ВПС-68 к воздействию внешних факторов проведены исследования прочности образцов из стеклопластика со схемой армирования $[0]_{13}$ с незащищенными торцами при изгибе по ГОСТ 56810-2015 и сжатии по ГОСТ 25.602-80 после воздействия факторов: условий камеры тропического климата, тепловлажностного и теплового старения, воды, влаги и химических сред (масла ИПМ-10 и топлива ТС-1). Результаты испытаний прочностных характеристик материалов после воздействия перечисленных внешних факторов в сравнении с исходными характеристиками (средние значения) приведены на рисунках 30 – 33 и в таблице 29.

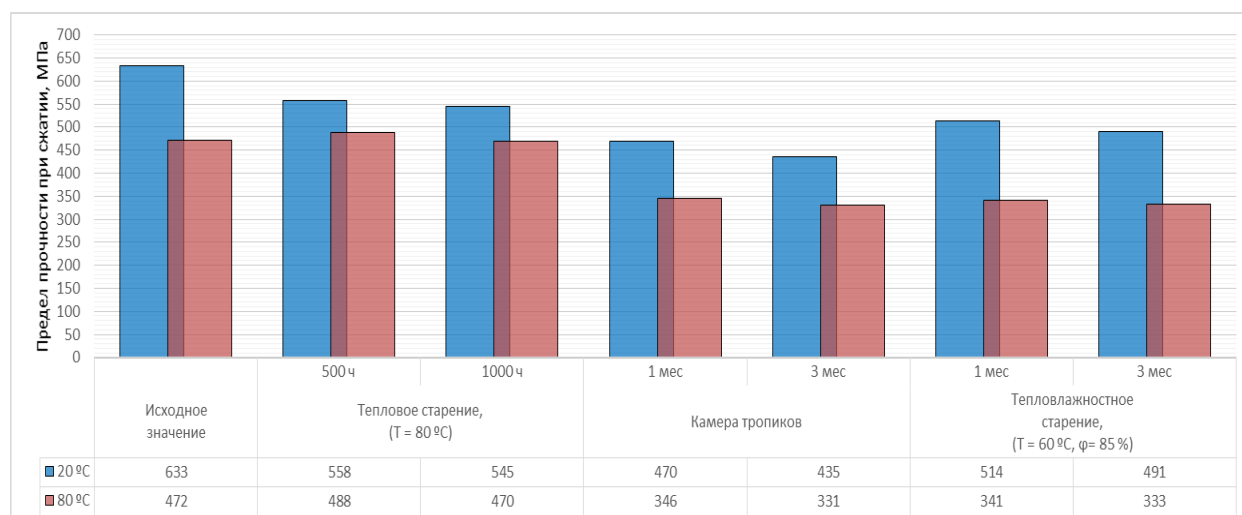


Рисунок 30 – Характер изменения прочности при сжатии стеклопластика ВПС-68 после воздействия тепловых, климатических внешних факторов

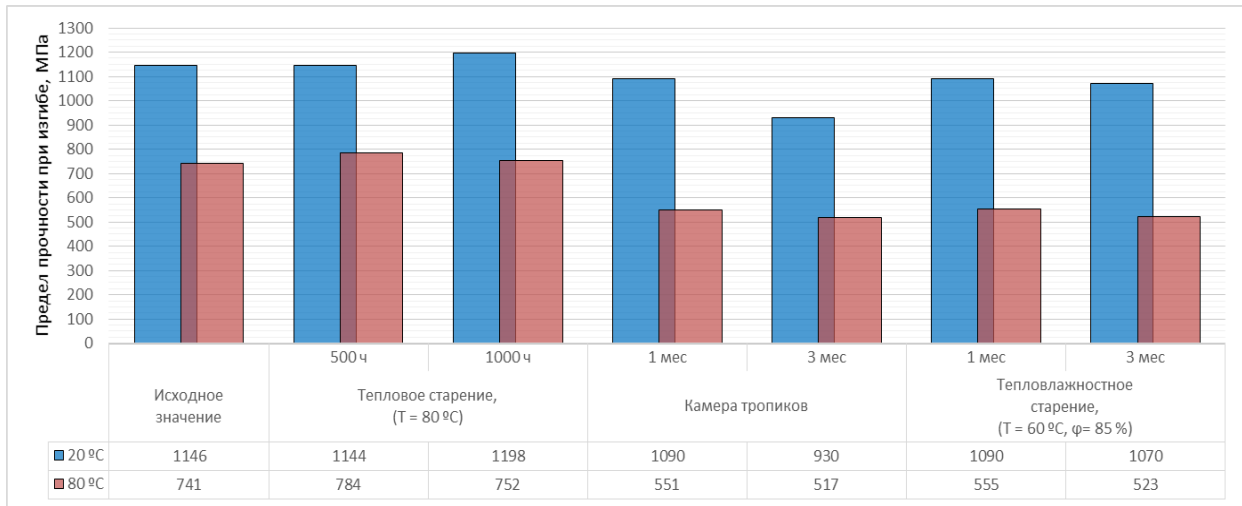


Рисунок 31 – Характер изменения прочности при поперечном изгибе стеклопластика ВПС-68 после воздействия тепловых, климатических внешних факторов

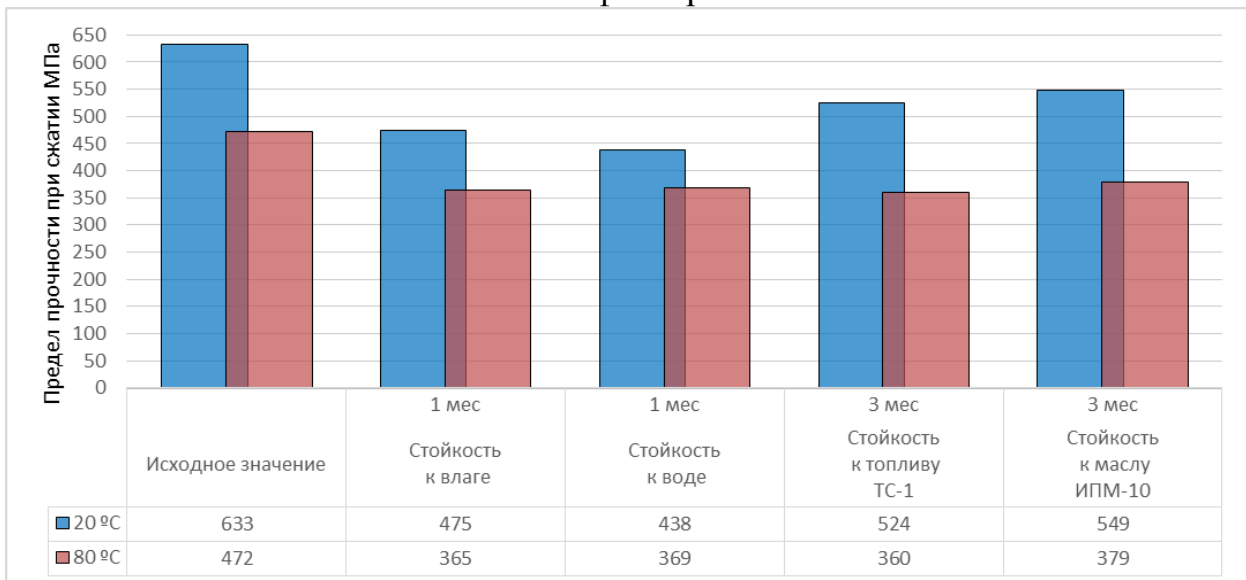


Рисунок 32 – Характер изменения свойств при сжатии стеклопластика ВПС-68 после экспозиции в агрессивных средах

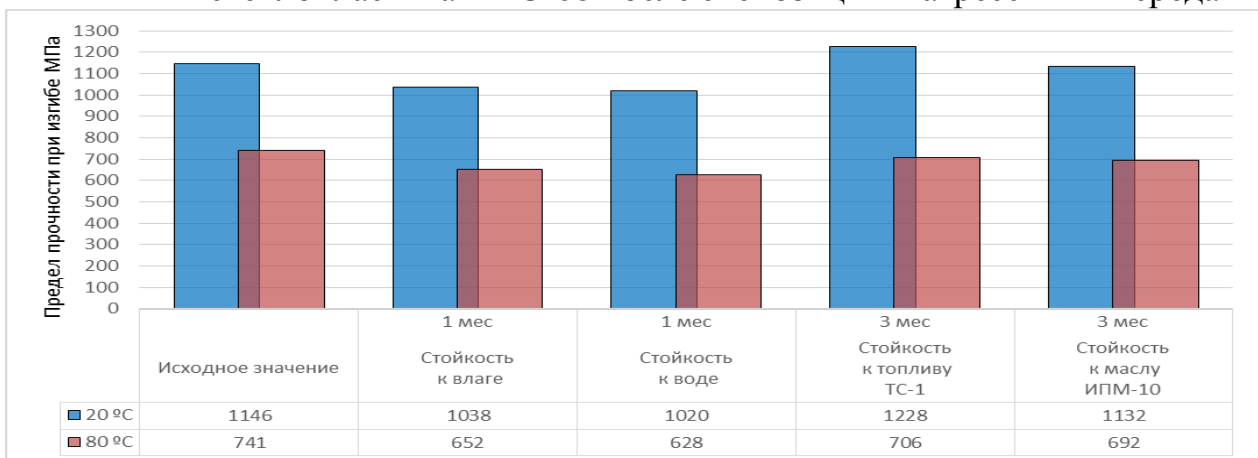


Рисунок 33 – Изменение свойств при поперечном изгибе стеклопластика ВПС-68 после экспозиции в агрессивных средах

Таблица 29 – Характер изменения механических свойств стеклопластика марки ВПС-68 после воздействия внешних факторов

Наименование характеристики, НД	Фактор воздействия	Длительность воздействия	Характер изменения механических характеристик, %, при температуре испытаний, °С	
			20	80
Прочность при сжатии $\sigma_{\text{сж}}^{\text{с}}$, % ГОСТ 33519-2015	Тепловое старение (Т=80°С)	500 ч	88,2	103,4
		1000 ч	86,1	99,6
	Камера тропиков	1 мес	74,2	73,3
		3 мес	68,7	70,1
	Тепловлажностное старение (Т=60°С, φ=85%)	1 мес	81,2	72,2
		3 мес	77,6	70,6
	Водостойкость	1 мес	69,2	78,2
	Влагостойкость Т=(20 ± 2)°С и φ=98%	1 мес	75,0	77,3
	Топливо ТС-1	3 мес	82,8	76,3
	Масло ИПМ-10	3 мес	86,7	80,3
Предел прочности при поперечном изгибе $\sigma_{\text{в}}^{\text{н}}$, % ГОСТ 56810-2015	Тепловое старение (Т=80°С)	500 ч	99,8	105,8
		1000 ч	104,5	101,5
	Камера тропиков	1 мес	95,1	74,4
		3 мес	81,2	69,8
	Тепловлажностное старение (Т=60°С, φ=85%)	1 мес	95,1	74,9
		3 мес	93,4	70,6
	Водостойкость	1 мес	89,0	84,8
	Влагостойкость Т=(20 ± 2)°С и φ=98%	1 мес	90,6	88,0
	Топливо ТС-1	3 мес	107,2	95,3
	Масло ИПМ-10	3 мес	98,8	93,4

Как видно из таблицы 29 стеклопластика марки ВПС-68 с схемой армирования [0] после воздействия внешних факторов демонстрирует высокий уровень сохранения упруго-прочностных свойств при изгибе (при 20 °С в интервале 81,2 – 104,5 %, при 80 °С в интервале 69,8 – 105,8 %) и сжатии (при 20 °С в интервале 68,7 – 88,2 %, при 80 °С в интервале 70,1 – 103,4 %) относительно исходных значений. Отмечено, что экспозиция образцов стеклопластика марки ВПС-68 с незащищенными торцами в влагонасыщенных условиях (камера тропического климата, водо- и влагостойкость) приводит к снижению уровня прочностных показателей в большей степени чем у углепластика марки ВКУ-59. Данное снижение прочности образцов из ПКМ

вероятно обусловлено более интенсивной сорбцией воды в межволоконном пространстве материала.

Кроме того, по разработанному двухступенчатому режиму отверждения полимерной матрицы марки ВСК-14-6 были изготовлены образцы клеевых соединений из клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).55 и проведены их исследования в исходном состоянии и при прогнозируемой рабочей температуре, в том числе после воздействия внешних факторов, а также температуре, на 25 °С превышающей максимальную температуру эксплуатации, с целью выявления запаса прочности. Результаты испытаний, а также уровень сохранения свойств представлены на рисунках 34 – 35 и в таблице 30.

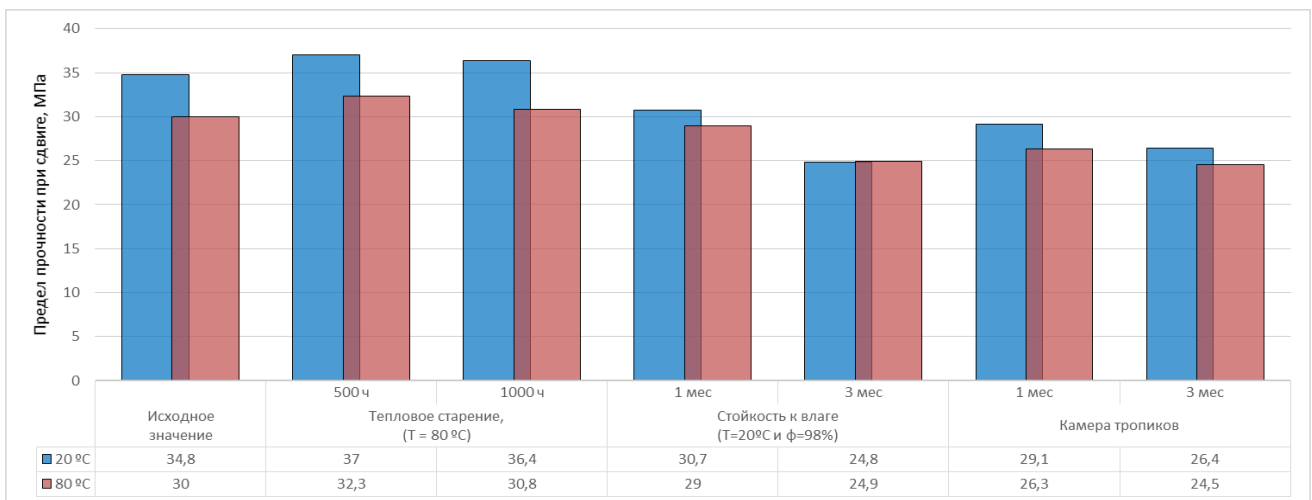


Рисунок 34 – Характер изменения прочности при сдвиге клеевых соединений стеклопластика марки ВПС-68 после воздействия внешних факторов

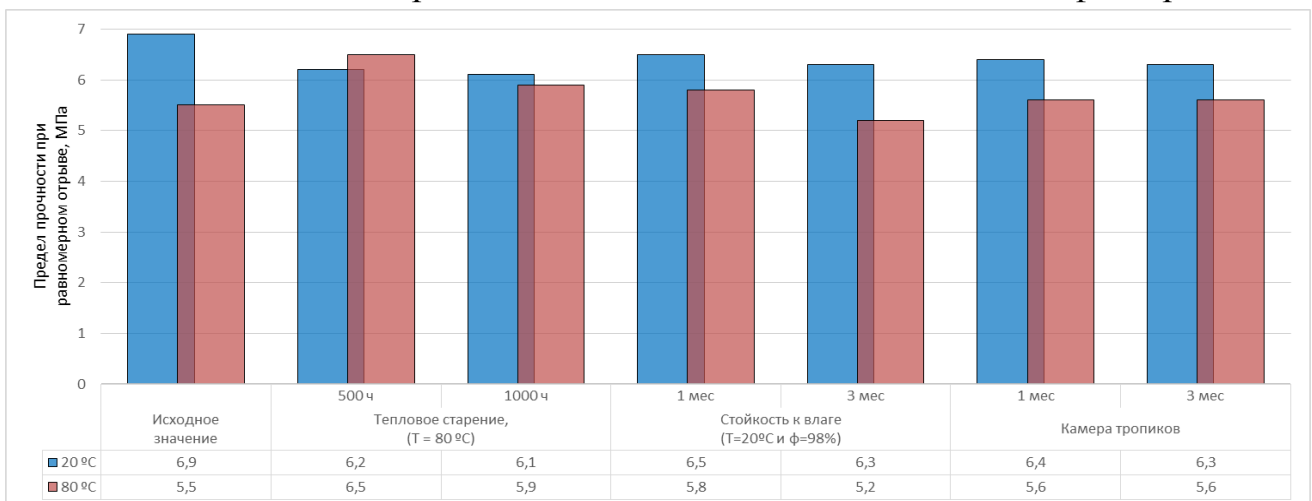


Рисунок 35– Характер изменения прочности при равномерном отрыве обшивки из углепластика марки ВКУ-59 от сотового заполнителя после воздействия внешних факторов

Таблица 30 – Характер изменения механических свойств клеевых соединений стеклопластика ВПС-68

Наименование характеристики, НД	Фактор воздействия	Длительность воздействия	Характер изменения механических характеристик, %, при температуре испытаний, °С	
			20	80
Прочность при сдвиге, τ , МПа ГОСТ Р 57834-2017	Тепловое старение (T=80°C)	500 ч	106,3	107,6
		1000 ч	104,6	102,6
	Камера тропиков	1 мес	83,6	87,7
		3 мес	75,9	81,7
	Влагостойкость T=(20 ± 2)°C и ϕ =98%	1 мес	88,2	96,7
		3 мес	71,3	83,0
Предел прочности при отрыве обшивки от сотового заполнителя, $\sigma_{отр}$, МПа ГОСТ 14760-69	Тепловое старение (T=80°C)	500 ч	89,8	118,2
		1000 ч	88,4	107,3
	Камера тропиков	1 мес	92,7	101,2
		3 мес	91,3	101,2
	Влагостойкость T=(20 ± 2)°C и ϕ =98%	1 мес	94,2	105,4
		3 мес	91,3	94,5

Как видно из таблицы 30, клеевые соединения стеклопластика ВПС-68 из клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП).55 в исходном состоянии и после воздействия климатических факторов демонстрируют высокий уровень сохранения прочностных характеристик. Прочность при сдвиге при 20 °С в интервале 71,3 – 106,3 %, при 80 °С в интервале 81,7 – 107,6 %. Прочность при отрыве обшивки от сотового заполнителя при 20 °С в интервале 88,4 – 94,2 %, при 80 °С в интервале 94,5 – 118,2%.

Необходимо отметить, что при испытании образцов на равномерный отрыв обшивки из стеклопластика марки ВПС-68 от сотового заполнителя констатирован характер разрушения по сотовому заполнителю, что свидетельствует о том, что прочность клеевого соединения выше прочности сотового заполнителя из фольги АМг2Н, яч. 2,5мм.

Стеклопластик марки ВПС-68 может быть рекомендован для изготовления деталей конструкционного назначения, в том числе для слоистых и сотовых конструкций, работающих в интервале температур от минус 60 до плюс 80 °С.

Глава 4. Разработка технологий изготовления клееных конструкций с применением разработанных полимерных композиционных материалов

4.1. Разработка технологии изготовления и исследование свойств конструктивно-подобных образцов панелей пола трехслойной сотовой конструкции

Использование сотового заполнителя ячеистой формы при проектировании трехслойных сотовых конструкций из ПКМ, является самым распространенным методом за счет высоких показателей прочности к малому весу. При проектировании трехслойных сотовых конструкций, в том числе панелей пола, выбор сотового заполнителя является важной задачей, т.к. одной из основных функций сот, является придание устойчивости обшивки из ПКМ и равномерная передача сдвиговых нагрузок [119, 120]. Для этого сотовый заполнитель должен обладать максимальной жесткостью. В настоящий период времени из доступных отечественных производителей сотовых заполнителей на Российском рынке, является АО «ОНПП Технология им. А.Г. Ромашина», сотовые заполнители которого нашли широкое применение в авиационной отрасли при изготовлении трехслойных сотовых конструкций из ПКМ. В таблице 31 представлены основные виды сотового заполнителя для конструкций панелей пола.

Таблица 31 – Основные виды сотового заполнителя для конструкций панелей пола.

Свойства	Наименование сотового заполнителя				
	АМг2-Н	ССП-1П	ССП-1	ПСП-1	
Основа	Алюминиевая фольга из сплава АМг2-Н-0,03	Стеклоткань марки Т-24(Ш)	Ткань электро-изоляционная марок Э3-100П, Э3/1-100П, Э1/1-100, Э1/1-100П	Арамидная бумага	
Размер грани ячейки, мм	2,5				
Плотность, кг/м ³	60	90	96	96	144
Прочность при сжатии, МПа	2,0	2,5	3,5	4,9	11,8

Как видно из таблицы 31, прочность при сжатии сотового заполнителя увеличивается с ростом плотности используемой основы. Для изготовления

трехслойных сотовых конструкций панелей пола необходимо чтобы сотовый наполнитель обладал высокими прочностными показателями. В связи с этим для дальнейшей работы по разработке технологии изготовления конструктивно-подобных образцов панелей пола трехслойной сотовой конструкции выбраны сотовые наполнители марок ССП-1 с плотностью 96 кг/м^3 и ПСП-1 с плотностью 96 и 144 кг/м^3 .

Анализ производителей панелей пола показывает, что наиболее распространенным способом изготовления панелей пола является прессовой метод. Данный метод более дешевый, менее энергоемок, менее трудоемок по сравнению с вакуум и вакуум-автоклавным методом, не требует большого количества вспомогательных материалов (дренажные слои, разделительные пленки, вакуумные пленки, герметизирующие ленты и т.д.), не требует высококвалифицированного персонала [91].

Прессовым методом формования по двухступенчатому режиму были изготовлены конструктивно-подобные образцы (КПО) панелей пола трехслойной сотовой конструкции с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 (с каждой стороны 1 слой КМКУ-6.80.УВ.65 к сотовому наполнителю и 1 слой КМКУ-6.80.УВ.45 с внешней стороны) и стеклопластика марки ВПС-68 (с каждой стороны 1 слой КМКС-6.80.Т60(ВМП).55 к сотовому наполнителю и 1 слой КМКС-6.80.Т60(ВМП).37 с внешней стороны). Габаритный размер изготовленных КПО трехслойной сотовой конструкции составил $1000 \times 650 \text{ мм}$. Толщина панели определялась количеством слоев клееного препрега соответствующей марки в обшивке для каждого КПО и высотой сотового наполнителя. На рисунке 36 представлен внешний вид полученных КПО (панелей).

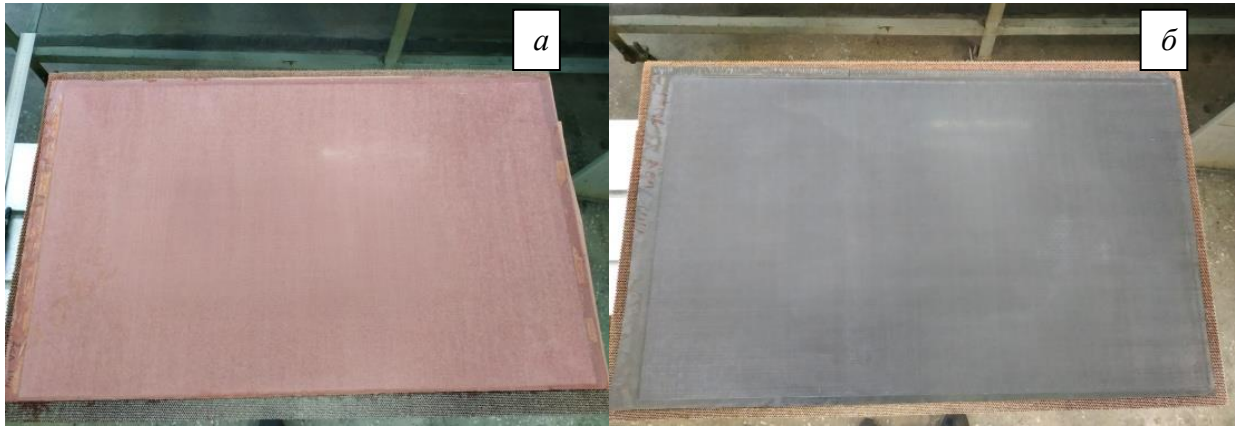


Рисунок 36 – Внешний вид изготовленных КПО трехслойной сотовой конструкции (панелей):

а – с обшивкой из клеевого препрега марки КМКС-6.80.Т60(ВМП);

б – с обшивкой из клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ

Из полученных КПО трехслойной сотовой конструкции были вырезаны образцы для определения основных свойств конструкций панелей пола, таких как разрушающая нагрузка при 3-х и 4-х точечном изгибе, прочность при сжатии сотовой панели и усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя, результаты по определению которых представлены в таблице 32.

Таблица 32 – Основные свойства образцов трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из клеевых угле- и стеклопрепрегов на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 с сотовым заполнителем марки ПСП-1 и ССП-1

Показатель	Значение показателя для КПО трехслойной сотовой конструкции с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 с сотозаполнителем			Значение показателя для КПО трехслойной сотовой конструкции с обшивками из стеклопластика марки ВПС-68 с сотозаполнителем		
	ССП-1 96 кг/м ³	ПСП-1 96 кг/м ³	ПСП-1 144 кг/м ³	ССП-1 96 кг/м ³	ПСП-1 96 кг/м ³	ПСП-1 144 кг/м ³
1	2	3	4	5	6	7
Разрушающая нагрузка при 4-х точечном изгибе при 20°С, Н (ГОСТ Р 56791)	-	2775	2615	-	1320	1585

1	2	3	4	5	6	7
Разрушающая нагрузка при 3-х точечном изгибе при 20°С, Н (ГОСТ Р 56798)	1245	3780	3830	1346	3590	4680
Прочность при сжатии трехслойной сотовой панели при 20°С, МПа (ГОСТ Р 56812)	10,3	13,5	5,8	10,3	14,1	6,8
Усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя при 20°С, Н/76мм (ГОСТ Р 56792)	410	450	121	354	411	365

Установлено, что разрушающая нагрузка при 4-х точечном изгибе образцов трехслойной сотовой конструкции с обшивками из клеевых угле- и стеклопрепрегов на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 при 20°С составила от 1340 до 2775 Н, разрушающая нагрузка при 3-х точечном изгибе при 20°С – от 3590 до 4680 Н. Прочность при сжатии трехслойных сотовых панелей при 20°С (от 5,7 до 14,1 МПа) обусловлена прочностью сотового заполнителя. Установлено, что усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя при 20°С составило от 121 до 450 Н/76мм. Характер разрушения – расслоение слоев обшивки говорит о том, что прочность клеевого соединения обшивки с сотовым заполнителем выше межслоевой.

Отмечено, что разрушающая нагрузка при 3-х точечном изгибе при 20°С КПО с применением сотового заполнителя марки ПСП-1 в 3 раза выше прочности с использованием сотового заполнителя марки ССП-1. Данное различие обусловлено жесткостью сотового заполнителя марки ПСП-1 относительно сотового заполнителя марки ССП-1.

Однако, ввиду ужесточения санкций, единственный поставщик сотового заполнителя из арамидной бумаги АО ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина приостановила производство сотового заполнителя марки ПСП-1. В этой связи, для изготовления трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками

из клеевых препрегов угле- и стеклопластиков на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 в качестве сотового заполнителя был выбран сотовый заполнитель марки ССП-1.

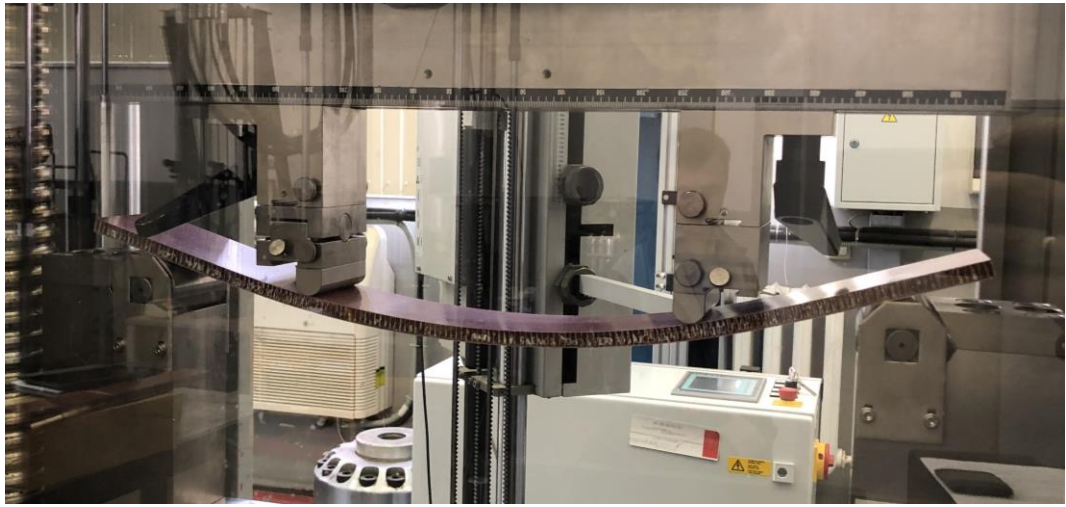


Рисунок 37 – Процесс испытания по определению разрушающей нагрузки при 4-х точечном изгибе трехслойной сотовой конструкции с обшивками из стеклопластика марки ВПС-68

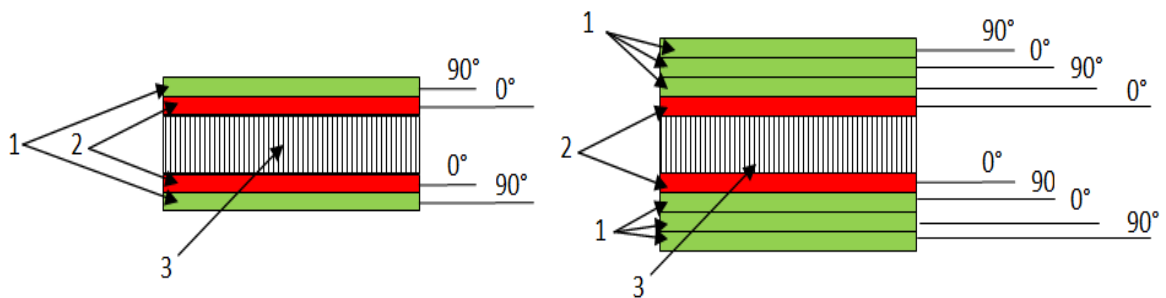


Рисунок 38 – Процесс испытания по определению разрушающей нагрузки при 4-х точечном изгибе трехслойной сотовой конструкции с обшивками из углепластика марки ВКУ-59

На сегодняшний день [91, 99] традиционный комплект панелей пола воздушного судна формируется из заготовок, представляющих собой трехслойную сотовую конструкцию, состоящую из двух несущих слоев (обшивок) и сотового заполнителя, расположенного между обшивками, адгезионных слоев (клеевая пленка), связывающих обшивки с сотовым

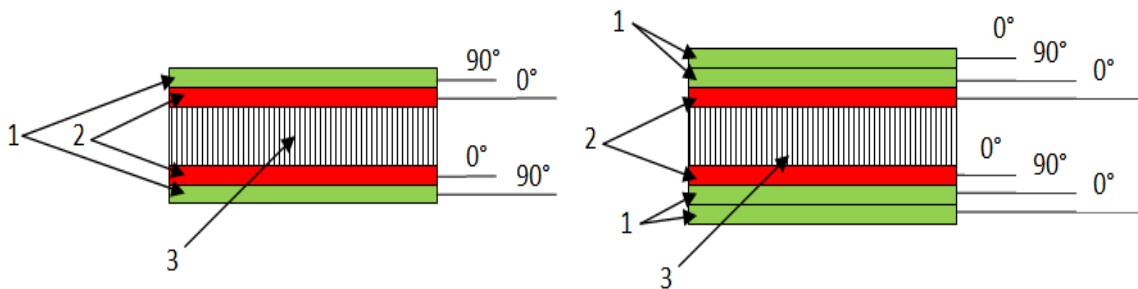
заполнителем и передающих нагрузку от сотового заполнителя к обшивкам и обратно. При этом они различаются по составу, схеме выкладки, физико-механическим характеристикам в зависимости от их расположения в салоне воздушного судна. Это обусловлено нагрузками, воспринимаемыми панелями пола в процессе эксплуатации воздушного судна. В конструкции, как отечественной, так и зарубежной авиационной техники они классифицированы следующим образом: Тип 1 – подкресельные; Тип 2 – панели проходов; Тип 3 – панели входов – выходов и буфетов; Тип 4 – высоконагруженные панели и панели багажно-грузового отсека.

Схема выкладки сотовой конструкции с применением клеевых препрегов марки КМКУ-6.80.УВ и клеевых препрегов марки КМКС-6.80.Т60(ВМП) с уменьшенным содержанием клеевого связующего (для обшивки) и увеличенным содержанием клеевого связующего (для склеивания обшивки с сотами) представлена на рисунках 39 и 40.



1 - КМКУ-6.80.УВ.45; 2 - КМКУ-6.80.УВ.65;
3 – сотовый наполнитель

Рисунок 39 – Схема выкладки трехслойной сотовой конструкции из клеевых препрегов марки КМКУ-6.80.УВ



1 - КМКС-6.80.Т60.37; 2 - КМКС-6.80.Т60.55;
3 – сотовый наполнитель марки

Рисунок 40 – Схема выкладки трехслойной сотовой конструкции из клеевых препрегов марки КМКС-6.80.Т60(ВМП)

Прессовым методом формования по двухступенчатому режиму были изготовлены КПО, представляющие собой заготовки панелей пола (ЗПП) трехслойной сотовой конструкции с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 четырех типов с применением сотового заполнителя марки ССП-1. Из полученных КПО трехслойной сотовой конструкции были вырезаны образцы для определения основных свойств конструкций панелей пола, таких как разрушающая нагрузка при 3-х точечном изгибе, прочность при сжатии сотовой панели, усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя, масса 1 м² сотовой конструкции и проведено сравнение полученных результатов со свойствами аналогов трехслойных сотовых конструкций панелей пола как отечественных так и зарубежных, свойства которых были рассмотрены в статье [121]. Результаты представлены в таблице 33.

Таблица 33 – Сравнительная оценка свойств трехслойных сотовых конструкций панелей пола различных производителей

Наименование показателя	Тип панели	Значение показателя для КПО трехслойной сотовой конструкции						
		НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ		АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»	ОАО «НИАТ»	Hexcel Composites	AIM Composites	
1	2	3	4	5	6	7	8	
Масса 1 м ² , кг	1	ЗПП-2-2	2,34	2,8	2,5	2,5	2,5	
		ЗПП-3-2	2,52					
	2	ЗПП-1-2	2,93	3,6	3,1	3,1	3,1	
		ЗПП-3-3	3,00					
	3	ЗПП-1-3	3,60	5,0	3,8	3,8	3,8	
	4			-	3,8	3,8	3,8	
	Разрушающая нагрузка при 3-х точечном изгибе при 20°C, Н	1	ЗПП-2-2	1245	1020	1300	1250	1100
			ЗПП-3-2	1228				
2		ЗПП-1-2	1352	1020	1500	1290	1400	
		ЗПП-3-3	2550					
3		ЗПП-1-3	2560	2000	2450	2450	2450	
4				-	2450	2460	2450	
Прочность при сжатии трехслойной сотовой панели при 20°C, МПа		1	ЗПП-2-2	10,28	4,9	5,1	5,5	4,8
			ЗПП-3-2	10,32				
	2	ЗПП-1-2	10,20	11,7	14,5	14,5	13,0	
		ЗПП-3-3	10,50					
	3	ЗПП-1-3	10,42	13,7	13,0	14,5	12,0	
	4			-	13,0	14,5	12,0	

1	2	3	4	5	6	7	8
Усилие отслаивания обшивки от сотового заполнителя при 20°С, Н/76мм	1	ЗПП-2-2	294	147	300	330	290
		ЗПП-3-2	320				
	2	ЗПП-1-2	244	147	250	330	330
		ЗПП-3-3	459				
	3	ЗПП-1-3	336	255	200	330	200
	4			-	200	330	200

По результатам анализа таблицы 33 установлено, что разработанные конструкции панелей пола по показателям разрушающей нагрузки при 3-х точечном изгибе, усилию отслаивания обшивки от сотового заполнителя, а также массы 1 м² сотовой конструкции находятся на уровне или превышают отечественные и зарубежные аналоги, но несколько уступают по показателю прочности при сжатии трехслойной сотовой конструкции типов 2-4. Снижение показателя прочности при сжатии сотовой конструкции обусловлено использованием сотового заполнителя марки ССП-1.

Проведена сравнительная оценка изготовленных КПО трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из углепластика марки ВКУ-59 и стеклопластика марки ВПС-68 в сопоставлении с существующими панелями пола для изделий Ил-114, Ил-96, Ту-204, Ту-214. Результаты представлены в таблице 34.

Таблица 34 – Сравнительная оценка весовой эффективности трехслойных сотовых конструкций панелей пола

Авиационные изделия и разработки	Материал, примененный для		Сотовый заполнитель	Масса 1 м ² , кг
	Верхней обшивки	Нижней обшивки		
Ил-96	Стеклотекстолит КАСТ-ВС	Углепластик пониженной горючести КМУ-3	Сотопласт ПСП-1	3,4–3,8
Ил-114	Стеклопластик на основе эпоксидного связующего			2,8–3,6
Ту-204	Высокомодульный стеклопластик			2,5–5,2
Разработки ВИАМ	Углепластик ВКУ-59			2,5–3,6
	Стеклопластик ВПС-68			2,5–3,8

Сравнительная оценка КПО трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из клеевых угле- и стеклопластиков на основе связующего марки ВСК-14-6 в сопоставлении с существующими панелями пола изделий Ил-114, Ил-96, Ту-204, Ту-214 показала их высокую весовую эффективность (масса 1 м² панелей пола 2,5–3,6 кг вместо 2,5–5,2 кг).

Таким образом, по разработанной технологии изготовления трехслойных сотовых конструкций с применением разработанных клеевых препрегов на основе связующего ВСК-14-6, а также путем комбинирования слоев клеевых препрегов доказана возможность создания конструкций панелей пола, по уровню свойств не уступающих отечественным и мировым аналогам.

4.2. Разработка технологии изготовления и исследование свойств толстостенной панели из углепластика марки ВКУ-59

С целью определения возможности изготовления толстостенных конструкций вакуум-автоклавным методом формования из клеевого препрега марки КМКУ-6.80.УВ.45 по трехступенчатому режиму отверждения углепластика ВКУ-59 с конечной температурой (140 ± 5) °С в течение (180 ± 5) минут были использованы следующие принципы [122-125]:

- ступенчатый подъем температуры, не допускающий перегрева детали;
- выбор связующего с оптимальной системой отвердителей, которые не приводят к перегреву;
- защита наружной поверхности формируемой детали замкнутым объемом воздуха, который снижает теплопередачу и эффект от теплового взаимодействия;
- использование предварительного математического моделирования процесса;
- проведение оптимизации регламентированного режима отверждения.

Применение многоэтапного нагрева в процессе отверждения связующего ведет к существенному снижению его саморазогрева и обеспечивает равномерное отверждение композиционного материала по всей толщине; этот вывод был сделан в разделе 3.4.

С использованием разработанного трехступенчатого режима была изготовлена толстостенная панель толщиной 12 мм, которая представляла собой пакет, который с помощью антиадгезионной пленки был разделен на элементарные панели (Рисунок 41). За счет этого приема толстостенная панель после формования была разделена на 10 элементарных панелей, каждая из которых включала по восемь слоев клевого препрега. Из разделенных панелей были изготовлены образцы для испытаний.

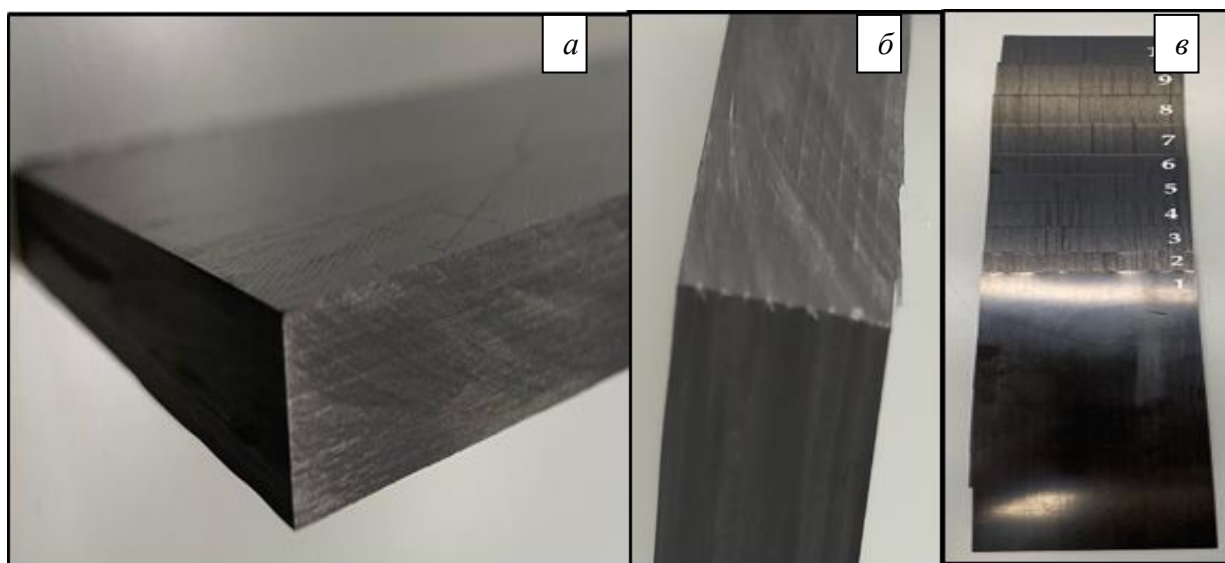


Рисунок 41. Толстостенная панель из углепластика ВКУ-59:
а-б) вид сбоку, в) элементарные панели

Из 10 элементарных панелей были изготовлены образцы массой $0,12 \pm 2$ г и методом ДСК анализа с использованием термоаналитического комплекса определена степень отверждения каждой элементарной панели (рисунок 42).

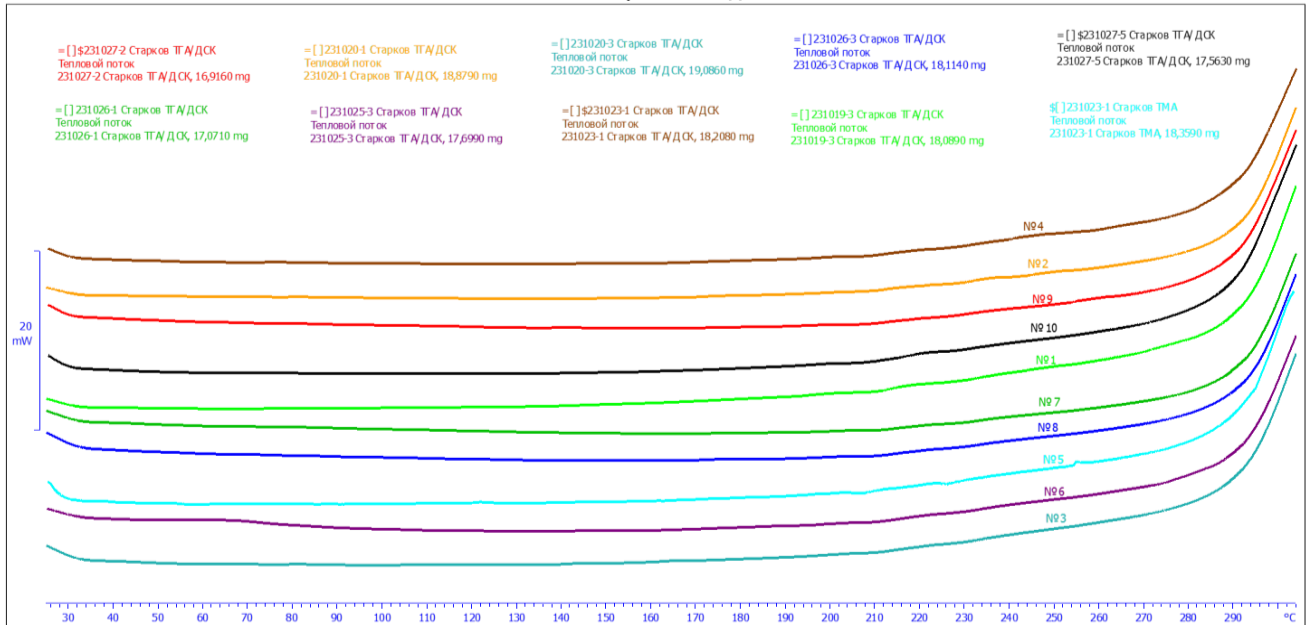


Рисунок 42 – Степень отверждения клеевого связующего марки ВСК-14-6 в элементарных панелях углепластика ВКУ-59

По результатам ДСК анализа установлено, что степень отверждения клеевого связующего ВСК-14-6 в составе всех элементарных панелей углепластика ВКУ-59 составила 99,9%. Остаточный тепловой эффект не выявлен, что свидетельствует о полном отверждении всех слоев в составе толстостенной панели.

Методом ТГА анализа определено содержание связующего ВСК-14-6 в составе каждой элементарной панели (рисунок 43).

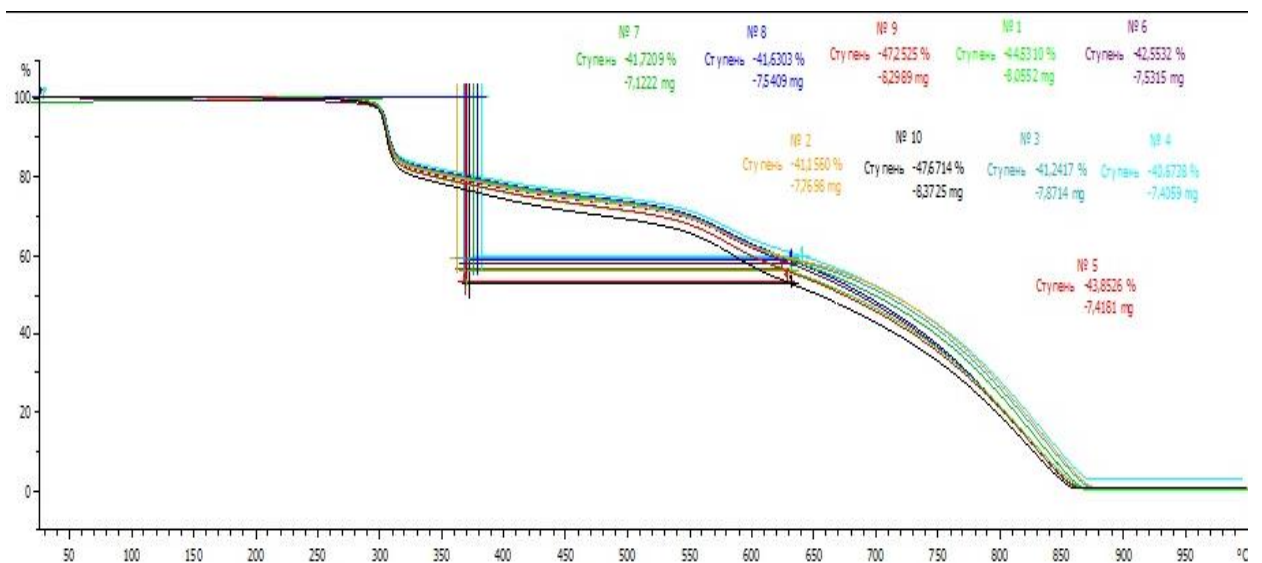


Рисунок 43 – Содержание клеевого связующего марки ВСК-14-6 в элементарных панелях углепластика ВКУ-59

Методом испытания на растяжение по ГОСТ Р 56785-2015 была определена прочность элементарных панелей из углепластика ВКУ-59 (рисунки 44 а, б).

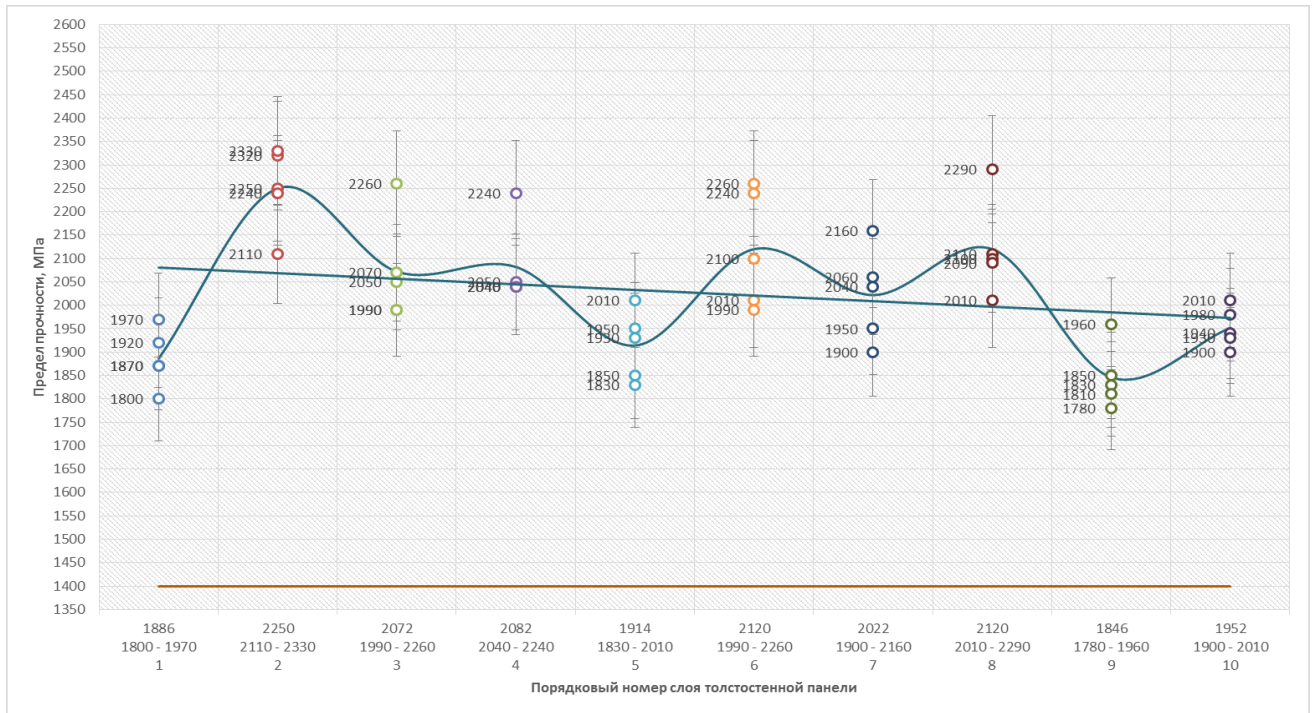


Рисунок 44а – Прочность при растяжении образцов углепластика марки ВКУ-59 в составе толстостенной конструкции

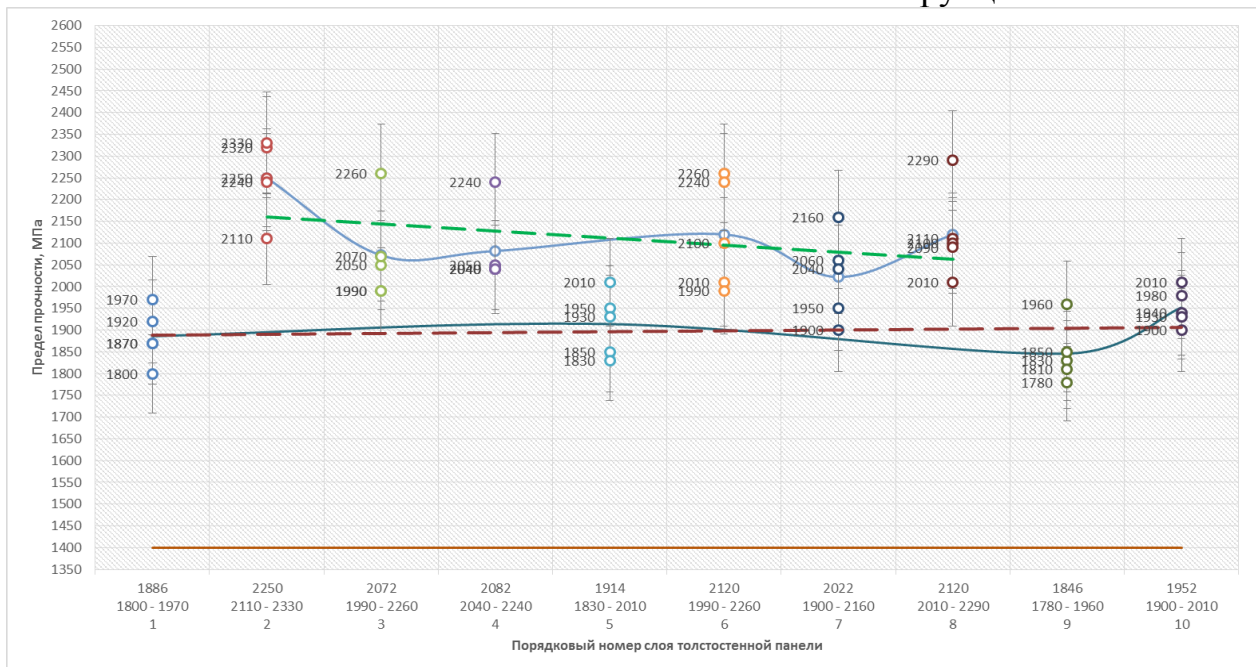


Рисунок 44б – Прочность при растяжении внутренних и внешних элементарных панелей из углепластика марки ВКУ-59 в составе толстостенной конструкции

По результатам испытаний установлено, что в составе толстостенной панели средние слои имеют прочность при растяжении, которая на 211 МПа выше прочности внешних слоев. Данный эффект, по-видимому, обусловлен следующим. Процесс автоклавного формования толстостенной панели сопровождается перераспределением связующего в объеме материала с оттоком связующего от средних слоев к внешним, за счет чего средние слои толстостенной панели характеризуются меньшим содержанием связующего, а внешние слои - увеличенным содержанием и, как следствие, толстостенная панель имеет повышенную прочность при растяжении средних слоев и пониженную прочность при растяжении внешних слоев.

Так как саморазогрев и, как следствие, деструкция полимерной основы клеевого препрега углепластика при отверждении монолитной конструкции по трехступенчатому температурно-временному режиму исключена, достигается равномерное отверждения материала по всей толщине, что обеспечивает минимальный разброс его характеристик.

Выявлены технологические особенности в процессе формования толстостенной конструкции, позволяющие реализовать проникающую способность клеевого связующего ВСК-14-6, его перераспределение по объему материала с достижением оптимального уровня физико-механических характеристик композиционного материала.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют о возможности изготовления по разработанному режиму отверждения толстостенных деталей из углепластика марки ВКУ-59 с высокими показателями прочностных характеристик.

Вывод в целом по главе 4: выявлены технологические особенности процессов формования композиционных материалов из препрегов на основе клеевого связующего ВСК-14-6 и угле- и стеклонаполнителя, учитывающие характер изменения реологических характеристик связующего в процессе его отверждения, что обеспечивает изготовление композиционных материалов различного типа: толстостенных, характеризующихся равномерным

распределение связующего по объему материала и трехслойных сотовых, характеризующихся отсутствием потеков связующего по торцам сотового заполнителя, что в целом обеспечивает достижение максимальной прочности клееной конструкции.

Глава 5. Практическая реализация полученных в работе результатов

1. Разработаны составы и технология изготовления клеевых препрегов на основе клеевого связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 с теплостойкостью 80°C, стекло- и угленаполнителей для ПКМ:

- углепрепреги на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 и высокопрочного углеродного жгутового наполнителя марки УВ-12К, в том числе с наносом связующего ($38 \pm 2\%$) - для изготовления деталей конструкционного назначения и с наносом ($63 \pm 2\%$) – для изготовления деталей сотовой конструкции;

- стеклопрепреги на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6 и стеклоткани Т-60(ВМП), в том числе с наносом связующего ($35 \pm 2\%$) - для изготовления деталей конструкционного назначения и с наносом ($65 \pm 2\%$) – для изготовления деталей сотовой конструкции.

2. В результате выполнения работы выпущены следующая техническая документация на разработанные материалы:

2.1. Технологические инструкции:

- ТИ 1.595-11-1173-2018;
- ТИ 1.595-11-1174-2018;
- Изменение № 1 к ТИ 1.595-11-1173-2018, в которой уточнены значения поверхностной плотности клеевой пленки и клеевого препрега,
- Изменение № 1 к ТИ 1.595-11-1174-2018 с присвоением литеры «О»,
- Изменение № 2 к ТИ 1.595-11-1173-2018 с присвоением литеры «О».

2.2. Технические условия:

- ТУ 1-595-11-1775-2018;
- ТУ 1-595-11-1776-2018;
- ТУ 1-595-УНТЦ-1930-2021

2.3. Технологическая рекомендация ТР 1.2.2757-2019 «Изготовление монолитных и трехслойных сотовых конструкций панелей пола с обшивками из клеевых угле- и стеклопрепрегов на основе клеевого связующего марки ВСК-14-6».

3. На разработанные марки клеевых препрегов и композиционных материалов клеевых на их основе получен патент на изобретение № 2676634 от 09.01.2019 г. «Препрег на основе клеевого связующего пониженной горючести и стеклопластик, углепластик на его основе».

4. Разработанные материалы исследованы в объеме квалификационной оценки свойств с оформлением паспорт на материал:

- паспорт № 1994 на углепластик марки ВКУ-59;
- паспорт № 1995 на стеклопластик марки ВПС-68.

5. Организован серийный выпуск разработанных клеевых препрегов и заготовок панелей пола на их основе на сертифицированном производстве в НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

6. Оформлено Решение № 11424-0182-143 по организации изготовления и поставки трехслойных сотовых заготовок панелей пола из неметаллических материалов производства НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ.

7. Углепластик марки ВКУ-59 и стеклопластик марки ВПС-68 внесены в конструкторскую документацию самолетов Ил-114-300 (маш. 0110 и маш. 1001) и Ил-76МД-90А для изготовления заготовок панелей пола на основе разработанных материалов.

Выводы

1. Обоснован выбор связующего пониженной горючести марки ВСК-14-6 с теплостойкостью 80°C, угле- и стеклонаполнителей для применения в составе клеевых препрегов. На основании результатов исследования реологических характеристик клеевого связующего марки ВСК-14-6 выявлены оптимальные температурно-временные параметры, необходимые для переработки связующего ВСК-14-6 в клеевой препрег. Разработаны составы и технология изготовления клеевых препрегов из клеевого связующего пониженной горючести ВСК-14-6 и стекло-, угленаполнителей.

2. На основании результатов исследования кинетики реакций отверждения клеевых препрегов установлены условия формирования оптимальной структуры полимерных композиционных материалов (угле- и стеклопластика) в процессе отверждения клеевого связующего в составе клеевого препрега, что подтверждено результатами исследования структуры разработанных ПКМ методом растровой электронной микроскопии.

3. Установлено, что углепластик марки ВКУ-59 и стеклопластик марки ВПС-68, а также трехслойные сотовые конструкции с обшивками на их основе полностью соответствуют требованиям авиационных норм по горючести. На основании результатов испытаний стекло-, углепластика и трехслойной панели на дымообразование установлено, что данные материалы и конструктивные элементы на их основе обладают высокой дымообразующей способностью, однако согласно требованиям государственных авиационных норм материал может быть допущен для применения в составе трехслойных сотовых для следующего назначения: в качестве панелей пола в пассажирской кабине, а также панелей пола в багажных отсеках. Результаты испытаний на токсичность продуктов, выделяемых в процессе горения трехслойных сотовых конструкций панелей пола показали соответствие требованиям к панелям пола, установленным в ведущих мировых авиастроительных корпорациях (Boeing, Airbus).

4. Определен характер изменения свойств углепластика ВКУ-59 при воздействии внешних факторов. Уровень сохранения упруго-прочностных

свойств при температуре 20 °С находится в интервале 79,6 – 103,8 %, при температуре 80 °С находится в интервале 71,5 – 102,3 % относительно исходных значений. Уровень сохранения прочностных свойств при сдвиге клеевых соединений при температуре 20 °С находится в интервале 68,4 – 118,8 %, при температуре 80 °С находится в интервале 66,0 – 119,3 % относительно исходных значений. Уровень сохранения прочностных свойств при отрыве обшивки от сотового заполнителя при температуре 20 °С находится в интервале 94,7 – 110,5 %, при температуре 80 °С находится в интервале 97,9 – 112,7 % относительно исходных значений.

5. Определен характер изменения свойств стеклопластика марки ВПС-68 при воздействии внешних факторов. Уровень сохранения упруго-прочностных свойств при температуре 20 °С находится в интервале 68,7 – 104,5 %, при температуре 80 °С находится в интервале 69,8 – 105,8 % относительно исходных значений. Уровень сохранения прочностных свойств при сдвиге клеевых соединений при температуре 20 °С находится в интервале 71,3 – 106,3 %, при температуре 80 °С находится в интервале 81,7 – 107,6 % относительно исходных значений. Уровень сохранения прочностных свойств при отрыве обшивки от сотового заполнителя при температуре 20 °С находится в интервале 88,4 – 94,2 %, при температуре 80 °С находится в интервале 94,5 – 118,2% относительно исходных значений.

6. Разработана технология изготовления и исследованы свойства трехслойных сотовых конструкций пониженной горючести, предназначенных для изготовления высоконагруженных панелей пола. Выявлены технологические особенности двухступенчатого процесса формования трехслойных сотовых конструкций, позволяющих исключить повышенную текучесть клеевого связующего по торцам сотового заполнителя и тем самым обеспечить формирование галтелей связующего требуемой формы, что обеспечивает уровень прочности клеевых соединений, определяющийся прочностью сотового заполнителя.

7. Разработана технология изготовления и исследованы свойства толстостенной конструкции из углепластика марки ВКУ-59. Установлено, что

саморазогрев полимерной основы клеевого препрега углепластика при отверждении монолитной толстостенной конструкции по трехступенчатому температурно-временному режиму исключен, достигается равномерное отверждения материала по всей толщине, что обеспечивает минимальный разброс его характеристик.

Список сокращений и обозначений

АП-25	- Авиационные правила, Часть 25 «Нормы летной годности самолетов транспортной категории
ВСК	- клеевое связующее для ПКМ
ДМА	- динамический механический анализ
ДСК	- дифференциальная сканирующая калориметрия
ЗПП	- заготовка панелей пола
Клеевой препрег	- препрег, который представляет собой наполнитель, пропитанный клеевым связующим расплавленного типа
КМКУ	- клеевые препреги на основе угленаполнителя
КМКУ-6.80.	- марка клеевого препрега, где
УВ.45(65)	- 6 – условное обозначение клеевого связующего, - 80 – максимальная рабочая температура пластика, - УВ – применяемый наполнитель, - 45(65) – содержание клеевого связующего в препреге
КМКС	- клеевые препреги на основе стеклонеполнителя
КМКС-6.80.	- марка клеевого препрега, где
Т60(ВМП).37(55)	- 6 – условное обозначение клеевого связующего, - 80 – максимальная рабочая температура пластика, - Т60(ВМП) – применяемый наполнитель, - 37(55) – содержание клеевого связующего в препреге
КПО	- конструктивно-подобный образец
НЛГ 25	- Нормы летной годности самолетов транспортной категории, утвержденные приказом Федерального агентства воздушного транспорта
ПКМ	- полимерный композиционный материал
ТГА	- термогравиметрический анализ
ТИ	- технологическая инструкция
ТР	- технологическая рекомендация
ТУ	- технические условия
УВ (УВ-12К)	- углеродный жгутовой наполнитель

Список литературы

1. Колобков А.С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор). Труды ВИАМ 2020 № 6-7, (дата обращения: 29.05.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44)
2. Раскутин А.Е. Конструкционные углепластики на основе новых связующих расплавленного типа и тканей Porcher. Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. №5
3. Каблов Е.Н. Химия в авиационном материаловедении //Российский химический журнал. 2010. Т. LIV. №1. С. 3-4
4. Каблов Е.Н. Роль химии в создании материалов нового поколения для сложных технических систем // Тез. докладов XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. Екатеринбург: УрО РАН, 2016. С. 25–26.
5. Шаймуратова Д.Р. Как и где в самолетостроении впервые появились композиционные материалы? Их достоинства и недостатки. Двадцать первая олимпиада посвящена 130-летию со дня рождения С.В. Ильюшина. Уфимский государственный авиационный технический университет" филиал в г. Туймазы 2014 г.
6. Савин С.П., Применение полимерных композиционных материалов в конструкциях самолетов семейства МС-21. Главный инженер. Управление промышленным производством. 2017;2.
7. Сенюшкин, Н. С. Применение композиционных материалов в конструкции БПЛА / Н. С. Сенюшкин, Р. Р. Ямалиев, Л. Р. Ялчибаева. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2011. — № 4 (27). — Т. 1. — С. 59-61. — URL: <https://moluch.ru/archive/27/2963/> (дата обращения: 29.05.2024).
8. Нестеренко Р.А., Магдин А.Г., Кудрявцев Д.В., Жанзакова Д.К. Применение композиционных материалов при проектировании носовых обтекателей летательных аппаратов. Вестник брянского государственного технического университета Том 2021 № 2, 2021. <https://bstu.editorum.ru/ru/nauka/article/42186/view>. (дата обращения: 29.05.2024).[dx.doi.org/10.30987/1999-8775-2021-2-13-20](https://doi.org/10.30987/1999-8775-2021-2-13-20).
9. Путилина П.М., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития. Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2023 № 8. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.05.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2023-0-8-85-99](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2023-0-8-85-99).
10. Фатеева М.Ф. Учебное пособие по дисциплине «Материаловедение», Ангарск 2021. С5

11. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / под ред. Ал.Ал.Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 557 с.
12. Кербер М.Л., Виноградов В.М. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. СПб.: Профессия. 2009. 560 с.
13. Батиров, Ш. Г. О восстановлении характерных дефектов корпуса водяного насоса / Ш. Г. Батиров. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 31 (165). — С. 5-8. — URL: <https://moluch.ru/archive/165/45295/> (дата обращения: 30.05.2024).
14. Раскутин А.Е., Соколов И.И. Углепластики и стеклопластики нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. УДК 678.8
15. Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения // Сб. тезисов XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии: в 6 т. СПб. 2019. Т. 4. С. 24.
16. Песецкий С.С., Мышкин Н.К. Полимерные композиты многофункционального назначения: перспективы разработок и применения в Беларуси. Полимерные материалы и технологии Т.2 (2016), №4, 6–29
17. Колпачков Е.Д. // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, ВИАМ. 2021. 112 с.
18. Интернет ресурс <https://www.inlineglass.ru/?id=50> (дата обращения: 29.05.2024)
19. Перепелкин К.Е. «Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты». 2011 г. Интернет ресурс <https://plastinfo.ru/information/articles/341/> (дата обращения: 29.05.2024)
20. Платонов А. А., Душин М. И. Конструкционный углепластик ВКУ-25 на основе однонаправленного препрега. Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015 №11. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.05.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-11-6-6).
21. Лизунов Д.А. Разработка высокопрочных углепластиков на основе эпоксисодержащих олигомеров. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. РХТУ им. Д.И. Менделеева 2014 г.
22. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты // СПб.: Научные основы технологии, 2009. 380 с.
23. Сатдинов Р.А. Новые конструктивно-технологические решения в создании современных элементов кондиционирования воздуха ЛА // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Полимерные композиционные материалы нового поколения и технологии их переработки», Москва, 2020. С. 6-22.
24. Интернет ресурс <https://molotokrus.ru/uglerodnoe-volokno-sposoby-polucheniya/> (дата обращения: 29.05.2024)

25. Румянцев А.Ф. Свойства конструкционных углепластиков, состав, структура армирования // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, ВИАМ. 2002. 113 с.
26. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов – М: Химия, 1981 -232 с.
27. Бунаков В.А., Головкин Г.С., Машинская Г.П. и др. // Армированные пластики. Под ред. Головкина Г.С., Семенова В.И. – М.: изд-во МАИ, 1997.- 404 с.
28. Михайлин Ю.А. Волокнистые полимерные композиционные материалы в технике // СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 720 с.
29. Интернет ресурс <http://www.Zoltek.com/products/p35> (дата обращения 25.07.2024).
30. AeroBASE technical data sheets. Rockwell Collins. Интернет ресурс URL: <https://www.rockwellcollins.com/> (дата обращения: 25.07.2024).
31. Distribution information of Hexcel production. Aim Composites. URL: <http://www.aimaltitude.com/> (дата обращения: 25.07.2024).
32. Gillfloor product data sheets. The Gill Corporation. URL: <https://www.thegillcorp.com/> (дата обращения: 25.07.2024).
33. Дориомедов М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор). Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2020 № 6-7. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37).
34. Васильев В.В. и др. Композиционные материалы: справочник // Москва, машиностроение, 1990. 512 С.
35. Куцевич К.Е. Клеевые препреги и углекомполиты на их основе. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. ФГУП «ВИАМ», 2014 г.
36. Тимошков П.Н., Севастьянов Д.В., Усачева М.Н., Хрульков А.В. Существующие и перспективные технологии получения ПАН-волокон (обзор). Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. № 11(83) 2019. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-11-68-74](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-11-68-74).
37. Гуняева А.Г., Сидорина А.И., Курносое А.О., Клименко О.Н. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Pocher Ind. и Toho Tenax // Авиационные материалы и технологии, 2018. №3. С. 18-26. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 15.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-3-18-26).

38. Сидорина А.И., Сафронов А.М., Куцевич К.Е., Клименко О.Н. Углеродные ткани для изделий авиационной техники // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2020. №12. Ст.05. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-12-47-58).
39. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-технич. журн., 2021. №3. Ст. 10. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 15.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116](https://doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116).
40. Евдокимов А.А., Гуляев И.Н., Начаркина А.В. Исследование физико-механических свойств объемно-армированного углепластика // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2020. №3. Ст.07. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2020-0-3-66-73](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-3-66-73).
41. Славин А.В., Силкин А.Н., Гриневич Д.В., Яковлев Н.О. Композиционные материалы с объемно-армированной структурой (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2022. №8. Ст.09. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.07.2024). [dx.doi.org/ dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-8-113-122).
42. Аврасин Я.Д., Бородин М.Я., Киселев Б.А. Стеклопластики в авиастроении // Авиационная промышленность. 1982. № 8. С. 80–84.
43. Давыдова И.Ф., Кавун Н.С. Стеклопластики – многофункциональные композиционные материалы // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 253-260.
44. Вавилова М.И., Кавун Н.С. Свойства и особенности армирующих стеклянных наполнителей, используемых для изготовления конструкционных стеклопластиков // Авиационные материалы и технологии. 2014. №3. С. 33-37. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-3-33-37).
45. Курносоев А.О., Вавилова М.И., Мельников Д.А. Технологии производства стеклянных наполнителей и исследование влияния аппретирующего вещества на физико-механические характеристики стеклопластиков. Авиационные материалы и технологии №1 (50) 2018. С 64-70. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 15.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-1-64-70).
46. Курносоев А.О., Мельников Д.А., Соколов И.И. Стеклопластики конструкционного назначения для авиастроения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №8. ст.08. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 25.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-8-8-8).
47. Курносоев А.О., Петрова А.П., Славин А.В., Вавилова М.И., Куршев Е.В. Сравнение свойств стеклопластиков на основе полиимидных связующих

- растворного и расплавного типа. Труды ВИАМ 2022 № 10. (дата обращения: 25.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2022-0-10-42-54](https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-10-42-54).
48. Алентьев А.Ю., Яблокова М.Ю. Связующие для полимерных композиционных материалов. Учебное пособие для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы» МГУ им. М.В. Ломоносова 2010 г. С20
49. Бабин А. Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013 № 4. УДК 678.8
50. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38-42. УДК: 678.7. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024).
51. Постнова М. В., Постнов В. И. Опыт развития безавтоклавных методов формования ПКМ. Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014 №4. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 25.07.2024) [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6](https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-4-6-6).
52. Коваленко А.В. Исследование свойств связующего для формования изделий методом пропитки под давлением. Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015 № 1. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 25.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2015-0-1-6-6](https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-1-6-6).
53. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024).
54. Панина Н.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Гребенева Т.А., Гуревич Я.М. Основные способы модификации эпоксидных полимерных материалов в России // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2014. № 9. С. 10-17.
55. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов (обзор). Авиационные материалы и технологии № 3(56) 2019. С48-58. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024). dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2019-0-3-48-58
56. Петрова Т.В. Низковязкие эпоксиды – полимерные связующие для намоточных армированных пластиков с повышенной трещиностойкостью. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва 2023.
57. Петрова А.П., Лукина Н.Ф. История развития и достижения в области создания клеящих материалов. Новости материаловедения. Наука и техника. 2018 № 5-6 (31) с. 38-46. УДК: 665.939.5

58. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Сереженков А.А. Конструкционные и термостойкие клеи //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 328-335. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024).
59. Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Петрова А.П., Исаев А.Ю. Свойства и назначение самозатухающих клеев ВК-11С и ВК-46Б // Новости материаловедения. Наука и техника. научный электронный журнал № 5-6 (31) 2018. С. 1-5.
60. Антипов В. В., Котова Е. В., Серебренникова Н. Ю., Петрова А. П. Клеевые связующие и клеевые препреги для алюмополимерных композиционных материалов. Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018, №5. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-5-44-54](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-5-44-54)
61. Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Петрова А.П., Аниховская Л.И. Клеящие материалы в конструкции лопастей вертолетов. Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016 № 7. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-7-7-7](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-7-7-7).
62. Петрова А.П., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Чурсова Л.В. Клеевые связующие для полимерных композиционных материалов на угле- и стеклоаполнителях // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2015. №9. Ст. 11. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-9-11-11](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2015-0-9-11-11).
63. Лукина Н. Ф., Дементьева Л. А., Аниховская Л. И. Клеевые препреги для слоистых алюмопестклопластиков класса СИАЛ // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014 №1. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-1-5-5](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-1-5-5).
64. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Тюменева Т.Ю., Авдоница И.А., Жадова Н.С. Клеи для авиационной техники // Российский химический журнал т. LIV, №1. 2010. С.46-52
65. Дементьева Л.А., Бочарова Л.И., Лукина Н.Ф., Петрова А.П., Многофункциональные эпоксидные клеи для авиационной техники // Клеи. Герметики. Технологии. 2006. №7. С. 18-20. <http://www.nait.ru/journals> (дата обращения 25.07.2024).
66. Петрова А.П., Лукина Н.Ф., Шарова И.А. Оценка прочности клеевых соединений, выполненных эпоксидными клеями, при воздействии различных факторов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2013. №8. С. 28–34.

- 67.Лукина Н.Ф., Дементьева Л.А., Тюменева Т.Ю., Шарова И.А., Куцевич К.Е. Свойства клеящих материалов авиационного назначения // Новости материаловедения. Наука и техника № 3. 2014
- 68.Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю. Клеевые препреги – перспективные материалы для деталей и агрегатов из ПКМ // Авиационные материалы и технологии, 2017. №S. С. 379–387. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024). dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-379-387.
- 69.Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Свойства и назначение композиционных материалов на основе клеевых препрегов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №8. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2014-0-8-5-5.
- 70.Дементьева Л.А., Куцевич К.Е., Лукина Н.Ф., Петрова А.П. Использование клеевых связующих для получения полимерных композиционных материалов. Новости материаловедения. Наука и техника. 2016. № 2(20).
- 71.Дементьева Л.А., Сереженков А.А., Лукина Н.Ф., Куцевич К.Е. Клеевые препреги и слоистые материалы на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 2. С. 19–21. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024). УДК: 621.792.053
- 72.Куцевич К.Е., Дементьева Л.А., Лукина Н.Ф. Свойства и назначение полимерных композиционных материалов на основе клеевых препрегов //Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016. №8. Ст.07. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 25.07.2024). dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2024-0-8-5-5.
- 73.Сурнин Е.Г., Кондрашов Э.К. Пожаробезопасные декоративно-отделочные материалы // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002: юбил. науч.-техн. сб. М.: МИСИС–ВИАМ, 2002. С. 271–281.
- 74.Начаркина А.В., Зеленина И.В., Валугева М.И., Барботько С.Л. Пожаробезопасность высокотемпературных углепластиков авиационного назначения (обзор) //Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.2022 № 7. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 25.07.2024). dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-7-134-150
- 75.Нормы летной годности самолетов транспортной категории: АП-25: утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства 11.12.2008. 3-е изд. с поправками 1–6. М.: Авиаиздат, 2009. 267 с.
- 76.Барботько С.Л. Пути обеспечения пожарной безопасности авиационных материалов. Российский химический журнал, т. LIV, № 1, 2010 г.

77. Павловский К.А., Ямщикова Г.А., Гуняева А.Г., Улькин М.Ю. Разработка связующего, не поддерживающего горение углепластика, для изготовления толстостенных изделий из ПКМ методом прессового формования// Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016 № 4 Ст. 64-75. <http://www.viam-works.ru>. (дата обращения 02.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307/6046/2016-0-4-8-8](https://doi.org/10.18577/2307/6046/2016-0-4-8-8).
78. Серкова Е.А., Швец Н.И., Застрогина О.Б. и др. Быстроотверждаемое фенолформальдегидное связующее, перерабатываемое по «crush-core» технологии, для пожаробезопасных материалов интерьера // Сб. тезисов докладов XIX конф. «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов». Обнинск, 2010. С. 70–71.
79. Innes J., Innes A. «Plastic flame retardants: technology and current developments» / Rapra Review Reports. 2003. V. 14. No. 12. 138 p.
80. Гусева Л. Пожаробезопасность авиапластиков. Пластикс № 6 (190) 2019. Интернет ресурс https://plastics.ru/upload/magazines/Plastics_6_2019/12/?ysclid=м6р41тqmt0435490091
81. Weil E.D., Levchik S.V., Ravey M., Zhu W. « A survey of recent progress in phosphorus-based flame retardants and some mode of action studies» // Phosphorus, Sulfur, and Silicon and the Related Elements. 1999. V. 144. No. 1. P. 17-20.
82. Gu J., Dang J., Wu Y., Xie Ch., Han Y. «Flame-retardant, thermal, mechanical and dielectric properties of structural non-halogenated epoxy resin composites» // Polymer-Plastics Technology and Engineering. 2012. V. 51. No. 12. P. 1198–1203.
83. Levchik S.V., Weil E.D. «A review of recent progress in phosphorus-based flame retardants» // Journal of Fire Sciences. 2006. V. 24. No. 5. P. 345–364.
84. Куцевич К.Е., Рубцова Е.В., Алёхин А.К., Емельянов А.С., Калужникова А.А. Конструкционный плёночный клей пониженной горючести. Патент РФ RU2803988C1 НИЦ "Курчатовский институт" - ВИАМ".
85. Каблов Е.Н., Тюменева Т.Ю., Куцевич К.Е., Хина М.Б., Старков А.И., Хайретдинов Р.Х. Препрег на основе клевого связующего пониженной горючести и стеклопластик, углепластик на его основе. Патент РФ RU2676634C1.
86. Барботько С.Л. Пожаробезопасность полимерных материалов авиационного назначения и конструктивных элементов на их основе: диссертация на соискание степени доктора технических наук: 05.16.09. ФГУП «ВИАМ», 2019 г. 333 с.
87. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Особенности испытаний авиационных материалов на пожароопасность. Часть 2. Испытания на горючесть. Влияние продолжительности экспозиции пламенем горелки.

- Пожаровзрывобезопасность 2015 Том 24 № 3. <https://www.fire-smi.ru/jour/article/view/351> (дата обращения 02.07.2024).
88. Барботько С.Л. Развитие методов оценки пожаробезопасности материалов авиационного назначения // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 516–526. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024). [dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-516-526).
89. Лобанов М.С. Разработка огнетеплозащитных покрытий для стеклопластика на основе перхлорвинилового смолы, модифицированной фосфорборсодержащими соединениями: диссертация на соискание степени кандидата технических наук: 02.00.06. ВГТУ, 2013 г.
90. Гусева Р.И., Феоктистов С.И. Особенности формования терслоиных панелей с наполнителем для хвостовых отсеков рулей направления пассажирских самолетов // Учёные записки Комсомольского-на Амуре государственного технического университета № IV-1(36). 2018. С 4-12. <https://elibrary.ru> (дата обращения 25.07.2024).
91. 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 Российской академии наук. 2017. Т. 19. №4 (2). С. 198–213.
92. Шершак П.В., Шокин Г.И., Егоров В.Н. Технологические особенности производства трехслойных сотовых панелей пола воздушных судов // Авиационная промышленность. 2014. №3. С. 34–42.
93. Кияненко К.Е., Зенитова Л.А., Кузьмин М.Г. Инновационные технологии в производстве сотовых панелей // Вестник технологического университета. 2015. Т.18, № 19. С. 60-63.
94. Душин М.И., Ермолаев А.М., Катырев И.Я. и др. Углепластики в панелях пола трехслойной конструкции // Авиационная промышленность. 1978. №6. С. 8–12.
95. Шершак П.В., Косарев В.А., Рябовол Д.Ю. Гибридные обшивки в сэндвич-конструкциях панелей пола летательных аппаратов. Авиационные материалы и технологии № 3 (52) 2018. С. 35-41. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2071-9140-2018-0-3-35-41](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-3-35-41).
96. Шершак П.В., Косарев В.А., Рябовол Д.Ю. Гибридные обшивки в сэндвич-конструкциях панелей пола летательных аппаратов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 3 (52). С. 35–41. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2071-9140-2018-0-3-35-41](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-3-35-41).
97. Шокин Г.И., Шершак П.В., Андрунина М.А. Опыт разработки и освоения производства сотовых панелей пола ЛА из отечественных материалов // Авиационная промышленность. 2017. №1. С. 32–39. <https://elibrary.ru> (дата обращения 25.07.2024).

98. Павлова С.А. Расчетно-экспериментальная методика проектирования трехслойных конструкций панелей пола самолета из высокопрочных композиционных материалов с учетом требований прочности и жесткости: диссертация на соискание степени кандидата технических наук: 05.07.02
99. Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Баранников А.А. Современные материалы для салона самолета // Труды ВИАМ электрон. науч.-технич. журн., 2021. №9. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 25.07.2024). dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2021-0-9-33-42
100. Старков А. И., Куцевич К. Е., Тюменева Т. Ю., Петрова А. П. Клеевые препреги пониженной горючести, предназначенные для изготовления интегральных и трехслойных сотовых конструкций авиационной техники // Труды ВИАМ электрон. науч.-технич. журн., 2022 № 5 (111), С. 41-52. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 25.07.2024). dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-5-41-52.
101. Мухаметов Р.Р., Петрова А.П. Термореактивные связующие для полимерных композиционных материалов: учебное пособие/ под общ. ред. Каблова Е.Н. Москва: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ. 2021. 528 с.
102. Antyufeeva N.V., Starkov A.I. The influence of the content of halogen-containing oligomer in the composition of VSK-14-6 adhesive binder on the kinetics of the curing process of prepregs on different fillers and a comparative analysis of the curing kinetics of prepregs based on VSK-14-1 adhesive binder // Polymer science, Series D. 2023. Vol. 16, № 4. P. 882-891.
103. Антюфеева Н.В., Старков А.И. Влияние содержания галогеносодержащего олигомера в составе клеевого связующего на кинетику процесса отверждения препрегов. VI Всероссийская научно-техническая конференция «Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения». 18 ноября 2022 Москва. С.198-216
104. Найденов Д.Д., Хасков М.А., Петрова А.П. Построение диаграммы изотермических превращений термореактивных полимеров на примере клеевой матрицы // Труды ВИАМ электрон. науч.-технич. журн., 2020 № 1, <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 29.07.2024). dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-1-47-57.
105. Баринов Д.Я., Мараховский П.С., Куцевич К.Е., Чуцкова Е.Ю. Математическое моделирование температурных полей с учетом кинетики отверждения толстостенной плиты стеклопластика. Перспективные материалы 2017 №5 С.19-28. <https://elibrary.ru> (дата обращения 25.07.2024).
106. Старков А. И., Куцевич К. Е., Петрова А. П., Антюфеева Н. В. К вопросу о выборе температурно-временного режима отверждения препрега углепластика КМКУ-6.80.SYT49(S) на основе клеевого связующего пониженной горючести

- // Труды ВИАМ электрон. науч.-технич. журн., 2023 №3. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 29.07.2024). dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2023-0-3-29-38
107. Антюфеева Н.В., Алексашин В.М., Столянков Ю.В. Определение степени отверждения ПКМ методами термического анализа // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 3. С. 79–83. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024). dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-3-79-83.
108. Валуева М.И., Зеленина И.В., Хасков М.А., Гуляев А.И. Подготовка углеродного волокна к нанесению интерфазного покрытия для композиционных материалов с керамической матрицей // Труды ВИАМ электрон. науч.-технич. журн., 2017 № 10. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 29.07.2024). dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2017-0-10-9-9
109. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон РУСАР-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего. Авиационные материалы и технологии № 4 (61) 2020. С. 19-26. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024). dx.doi.org /10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
110. Гуляев А.И., Шуртаков С.В. Количественный анализ микроструктуры граничного слоя «волокно–матрица» в углепластиках // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2016 № 7. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 28.07.2024). dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2016-0-7-8-8
111. Black S. Advanced materials for aircraft interiors // Composites World. 2006. No. 11. P. 1–3
112. Black S. FAR Part 25 standards // High Performance Composites. 2006. No. 11. P. 1–2.
113. Airbus Industrie. Technical Specification № 2520M1M015601. 2003. P.9
114. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: учебное пособие/ под общ. ред. Е.Н. Каблова. Москва: ВИАМ. 2018. 424 с.
115. Вредные вещества в промышленности. Т.2. Неорганические и элементоорганические соединения /изд.5, стереотипное/ М.– Л.: Химия. 1965. 620 с.
116. Ефимов В.А., Шведкова А.К., Коренькова Т.Г., Кириллов В.Н. Исследование полимерных конструкционных материалов при воздействии климатических факторов и нагрузок в лабораторных и натуральных условиях. // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013 №1 [http://www.viam-](http://www.viam-works.ru)


- works.ru (дата обращения: 28.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2013-0-1-8-8](https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2013-0-1-8-8)
117. Старцев В.О., Валева Е.О., Гуляев А.И. Влияние старения поверхности полимерных композиционных материалов на их механические свойства // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2020. №8(90). Ст. 7. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения 11.08.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76](https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-8-64-76).
118. Старцев В.О. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов и защитных покрытия в умеренно-тёплом климате // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва, ВИАМ. 2018. 297 с.
119. Шершак П.В., Яковлев Н.О., Шокин Г.И., Куцевич К.Е., Попкова Е.А. Метод оценки и факторы, влияющие на качество склеивания обшивки с сотовым наполнителем в конструкциях пола и интерьера воздушных судов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 2 (59). С. 81–88. <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения 25.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88](https://dx.doi.org/10.18577/2071-9140-2020-0-2-81-88)
120. Шершак П.В., Косарев В.А., Куриленко Н.В. Влияние высоты полимерного сотового наполнителя на жесткость трехслойных сотовых панелей пола воздушных судов // Авиационная промышленность. 2016. №2. С. 49–52. <https://elibrary.ru> (дата обращения 25.07.2024).
121. Сарычев И.А., Серкова Е.А., Хмельницкий В.В., Застрогина О.Б. Терморезистивные связующие для материалов панелей пола летательных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №7 (79). Ст. 26-33. <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 25.07.2024). [dx.doi.org/ 10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33](https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-7-26-33).
122. Дмитренко Ю.И., Захаров Ю.В., Сборщиков С.В. Моделирование процесса отверждения толстостенных конструкций из полимерных композиционных материалов // Инновационная наука. 2016. №12-4. С. 31–36.
123. Тюков Н.И., Даутов А.И., Закурдаев Е.А. Математическая модель управления процессом разогрева автоклава при производстве изделий из композиционных материалов // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 10. «2 (27). С. 159–163.
124. Способ изготовления толстостенных слоистых изделий из полимерных композиционных материалов: пат. 2424115 Рос. Федерация. №2009139775/05; заявл.28.10.09; опубл. 20.07.11.
125. Способ изготовления толстостенных слоистых изделий из полимерных композиционных материалов: пат. 2286253 Рос. Федерация. №2005112423/12; заявл.25.04.05; опубл. 27.10.06.

Приложение 1

Решение о внедрении

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ФГУП «ВИАМ»



Е.Н. Козлов

« » 2020 г.

УТВЕРЖДАЮ

Управляющий директор
ПАО «Ил»



С.В. Ярконой

« » 2020 г.

РЕШЕНИЕ № 11424-0182-143

по организации изготовления и поставки трехслойных сотовых заготовок панелей пола из неметаллических материалов производства ФГУП «ВИАМ» для самолета Ил-114-300

В соответствии с конструкторской документацией самолета Ил-114-300 панели пола должны изготавливаться из трехслойных сотовых заготовок типа UNS И 756.18.612-2019 фирмы «AIM Altitude UK Ltd» (Великобритания).

В соответствии с техническими требованиями ПАО «Ил», во ФГУП «ВИАМ» в рамках ИИР ГК № 17411.1770290019.18.007 от 22.02.2017 шифр «Интеллект 2017-2019» были разработаны материалы КМКУ-6.80. (ТУ 1-595-11-1775-2018), а также КМКС-6.80.Т60(ВМП) (ТУ 1-595-11-1775-2018) для панелей пола и проведены соответствующие физико-механические и прочностные испытания образцов трехслойных сотовых заготовок панелей пола на соответствие требованиям ПАО «Ил», в том числе испытания по пожаробезопасности на соответствие требованиям АП-25 п. 25.853 (а).

Результаты испытаний показали соответствие заготовок панелей пола требованиям ПАО «Ил» и АП-25 п. 25.853 (а).