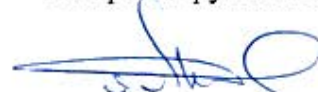


Федеральное автономное учреждение
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени
профессора Н.Е. Жуковского»
(ФАУ «ЦАГИ»)

На правах рукописи



ПАВЛОВ МИХАИЛ ВАЛЕРЬЕВИЧ

МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРЕХСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ
ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Специальность 2.5.13. Проектирование, конструкция, производство, испытания и
эксплуатация летательных аппаратов

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель,
кандидат технических наук
А.А. Свиридов

Жуковский 2025

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	2
Введение	3
1 Аналитический обзор литературных источников	17
Выводы к разделу 1	25
2 Разработка методик испытаний	26
2.1 Существующие методики испытаний	28
2.2 Испытания на растяжение	28
2.3 Испытания на сдвиг	31
2.4 Испытания на сжатие	34
2.5 Испытания на торцевое сжатие	38
Выводы к главе 2	42
3 Методика упрочнения нагружаемых торцов при торцевом сжатии..	43
3.1 Математическая модель.....	43
3.2 Исследования влияния изменения глубины упрочнения.....	45
3.3 Определение предельной толщины исходных образцов для реализации упрочнения	52
3.4 Технология упрочнения торцов	55
Выводы к главе 3	58
4 Отработка разработанных методик испытаний	59
4.1 Испытания ПКМ трехслойных панелей с сотовым наполнителем из арамидной бумаги	59
4.1.1 Испытания на сдвиг	60
4.1.2 Испытания на торцевое сжатие	62
4.1.3 Испытания на сжатие.....	63
4.1.4 Испытания на растяжение.....	66
4.2 Испытания ПКМ трехслойных панелей с алюминиевым сотовым наполнителем на торцевое сжатие с учетом климатических факторов.....	69
4.2.1 Влияние климатических факторов на прочность	69
4.2.2 Объект испытания.....	70
4.2.3 Результаты испытаний.....	74
4.3 Испытания ПКМ трехслойных панелей с перспективными наполнителями	76
4.3.1 Объект испытания.....	78
4.3.2 Результаты испытаний и обсуждение.....	78
4.3.1 Исследование влагопоглощения перспективных наполнителей	80
Выводы к разделу 4	81
Заключение.....	83
Список литературы.....	85
Приложение А.....	96
Приложение Б	119
Приложение В.....	143
Приложение Г	163
Приложение Д.....	183

Введение

Развитие современной авиационной техники тесно связано с применением полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструкции летательных аппаратов (ЛА), предъявляемые к ним требования по прочности и массе непрерывно повышаются, а условия эксплуатации становятся более жесткими. Использование ПКМ позволяет решать приоритетные задачи при конструировании новой авиационной техники, такие как снижение массы, повышение прочности, жесткости, а также технологичности конструкции планера. Помимо силовых воздействий, конструкция планера подвергается комплексу физических воздействий эксплуатационных факторов различного вида: температура, влажность, излучения, агрессивные среды и т.д. в сочетании с необходимостью эффективно выполнять теплоизолирующие функции. Решение подобных задач наиболее актуально для конструкций, составляющих значительную часть летательного аппарата.

Одним из недостатков традиционных слоистых ПКМ является пониженная способность восприятия нагрузок, направленных перпендикулярно плоскости слоев – нагрузки «из плоскости». Такие нагрузки приводят к зарождению расслоений между слоями и сквозным трещинам в слоях ПКМ и способствуют, преждевременному и неконтролируемому процессу разрушения. Поэтому они должны быть исключены, если это возможно, или минимизированы еще на этапе проектирования конструкции.

В одной из первых статей о трехслойных конструкциях [1], Хоффом и Маутнером было дано определение, которое вряд ли когда-либо потеряет свою актуальность и до сих пор встречается во многих работах по трёхслойным конструкциям: «The characteristic feature of the sandwich construction is the use of a multilayer skin consisting of one or more high-strength outer layers (faces) and one or more low-density inner layers (cores)», которое можно перевести как:

«Характерной особенностью сотовых конструкций является использование одной или нескольких высокопрочных обшивок и одного или более слоев внутреннего заполнителя».

Трехслойная конструкция представляет собой систему, которая состоит из двух сравнительно тонких обшивок и более толстого внутреннего слоя – заполнителя, рисунок 1. В настоящее время, с развитием материалов и технологий для производства трёхслойных панелей может быть использовано великое множество материалов и их комбинаций [2,4-5,11-12,55-56]. Огромное влияние на свойства оказывает правильный выбор материалов трехслойной панели. Обычно для обшивок используются более прочные материалы (стали, алюминиевые сплавы и ПКМ на основе стеклянных, углеродных и кевларовых волокон), тем самым внешние обшивки способны воспринимать высокие продольные нагрузки в плоскости. Заполнитель изготавливают из относительно малопрочных материалов с малой плотностью (бумага, пенопласты, пластмассы, ПКМ) хотя в зависимости от требований к конструкции также могут использовать металлы (алюминиевые сплавы, титан), а также углепластик.

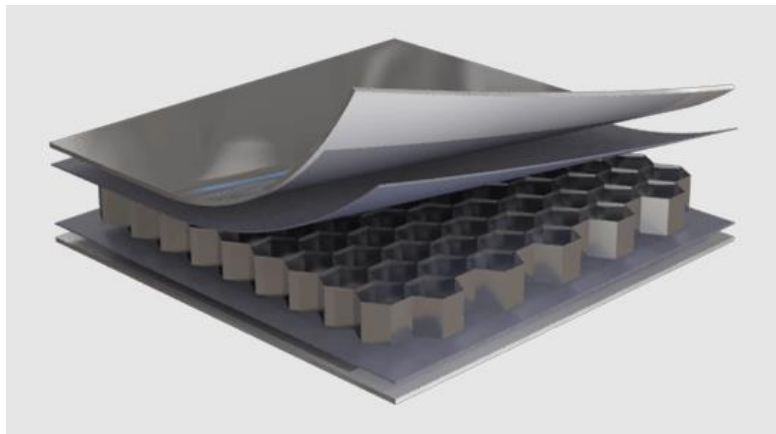


Рисунок 1 – Типовая конструкция трехслойной панели

За счет такого строения, трёхслойные панели по сравнению с алюминиевыми или с панелями из традиционных слоистых ПКМ позволяют достичь большей жесткости на изгиб при несущественном увеличении массы конструкции.

Трехслойные панели аналогичны двутавровой балке. Один несущий слой воспринимает сжимающее усилие, другой - растягивающее, а заполнитель соответствует стенке двутавра, обеспечивая сплошное опирание несущих слоев, значительно увеличивая их местную жесткость и сохраняя заданную форму даже при значительных нагрузках.

Если сравнить панель из сплошного материала, принимая ее толщину, жесткость, изгибную прочность и массу равными единице, и трехслойной панелью единичной толщины, то можно заметить, что жесткость трехслойной панели будет в 7 раз выше, изгибная прочность - в 3.5 выше, а масса (за счет заполнителя панели) увеличится всего лишь на 3%. При увеличении толщины сравниваемых материалов в три раза, жесткость трехслойной панели превышает жесткость панели из сплошного материала в 37 раз, изгибную прочность - до 9 раз, а масса возрастает всего на 6% [72].

Как можно заметить, с увеличением толщины заполнителя значительно увеличивается жесткость трёхслойной панели без заметного увеличения веса. Из-за высокой жесткости таких панелей они могут быть использованы без традиционных дополнительных элементов жесткости, таких как стрингеры и шпангоуты, которые используются в традиционных конструкциях из типовых материалов.

Заполнители можно разделить на два основных типа: сотовые и сплошные. Каждый из этих типов заполнителей может быть применен в конструкции ЛА в зависимости от предъявляемых к ней требований.

Первое упоминание о многослойных конструкциях относится к 1845г., она была применена английским инженером Р. Стефансоном при строительстве железнодорожного моста. В СССР конструкция такого типа впервые была предложена и разработана в 1928 году, Зоншайном С.И.

В 1960-х годах на смену Боинга В-47 пришел Конвэр В-58, конструкция которого была намного легче за счет обширного использования материалов с сотовым заполнителем (примерно 80% обшивки планера). Проведенные исследования показали, что внедрение многослойных панелей в конструкции створок ниш шасси, тормозных щитков, закрылков и рулей направления ведет к заметному улучшению весовой (массовой) эффективности ЛА.

Например, в конструкции истребителя F15 «Игл» трехслойные панели применяются в рулях направления и поворотных стабилизаторах, что совместно с использованием ПКМ в планере позволило снизить массу конструкции на 15-20%, и уменьшило взлетную массу ЛА примерно на 6%. В истребителе Нортроп F5

«Фридом Файтер» применение ПКМ и трехслойных панелей в конструкции вертикального и горизонтального оперения позволило повысить жесткостные характеристики и снизить массу на 20-30%. Замена материала с алюминиевого сплава Д16 на ПКМ с сотовым наполнителем в конструкции серворуля в самолете Ан-22 позволила увеличить разрушающую нагрузку на 35%, снизить вес на 26% при сохранении требуемой жесткости конструкции. Применение трехслойных материалов для панелей пола самолета Boeing 747 снизило вес на 30% и позволило повысить долговечность в 3-4 раза.

Современные летательные аппараты разрабатываются с учетом жестких требований к безопасности полетов и условиям эксплуатации. В процессе жизненного цикла авиаконструкция подвергается интенсивным режимам полетов в различных метеорологических и климатических условиях, а именно: циклические нагрузки, резкие изменения температуры, аэродинамические воздействия. И это далеко не полный список воздействий, которым подвергаются конструкции самолетов и вертолетов. Для гражданской авиации остро стоят вопросы увеличения ресурса, экологичности, комфортности и др. Решение большинства этих задач возможно благодаря применению более технологичных материалов, улучшенных конструктивно силовых схем. Для рационального проектирования конструкции также необходимо всегда искать компромисс между получением максимальной весовой (массовой) эффективности за счет применения новых материалов и стоимостью их производства. Доля применения ПКМ в конструкциях ЛА может варьироваться в зависимости от типа ЛА, его назначения и технических требований. В гражданской авиации для достижения оптимального баланса между весовой (массовой) эффективностью и стоимостью производства необходимо использовать примерно 15 - 25% от общей массы ЛА [71]. Применение ПКМ в указанном диапазоне позволит снизить взлетную массу, улучшить аэродинамические характеристики и экономическую эффективность ЛА, сохраняя при этом необходимую прочность и надежность.

Постепенно, с развитием технологий производства, внедрением автоматизированных и роботизированных процессов, использованием

искусственного интеллекта, можно заметить, что этот процент достигается в реальных конструкциях. Если в конструкции самолета Ту-204 объем применения ПКМ составлял 14% от его общей массы, то в перспективных пассажирских воздушных судах (ВС) Airbus и Boeing он достигает 25% [71].

Таким образом, многослойные панели являются одним из наиболее перспективных конструктивных элементов конструкции ЛА, так как могут сочетать в себе различные функциональные и прочностные свойства, что приводит к созданию высокотехнологичных систем. Однако в прошедшие десятилетия основные усилия были сосредоточены на исследовании слоистых пластиков, а трехслойным материалам не уделялось должного внимания с точки зрения исследования и прогнозирования прочностных характеристик. Следовательно, актуальной задачей в настоящее время является предоставление конструкторам данных, методологий, методов и методик, которые позволят им разрабатывать и внедрять трехслойные материалы в конструкции ЛА. Эти данные должны быть эффективными, надежными и удобными в использовании, а также основываться на глобальном и локальном понимании механики поведения трехслойных материалов. Такой подход в свою очередь опирается на способности испытывать, статистически обосновывать, контролировать и моделировать свойства и конструкции этих материалов.

Диссертационная работа направлена на развитие методического обеспечения процесса получения расчетных характеристик для трехслойных материалов системы «обшивка-заполнитель-обшивка».

Диссертационная работа включает в себя 4 главы. Первая глава посвящена обзору литературы, анализу, систематизации и обобщению данных и научных трудов на тему исследования. Рассматриваются основные способы изготовления, подходы для правильного выбора материалов в зависимости от задач, а именно: аналитические, численные и расчетно-экспериментальные методы для оценки прочности конструкций из трехслойных материалов.

Во второй главе рассматриваются существующие методики испытания трехслойных материалов, анализируется основная проблематика и недостатки, а

также предлагаются методы совершенствования. Предложенные усовершенствования методик испытаний были обобщены и структурированы в виде стандартов организации Системы менеджмента качества (СТО СМК) Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ») для получения механических свойств трехслойных материалов.

В третьей главе представлены результаты моделирования испытаний и виртуальная отработка методики для решения проблемы подготовки образцов перед испытаниями, в частности отработка оптимальной глубины упрочнения торцов образца при торцевом сжатии.

В четвертой главе представлена верификация и апробация разработанных методик на примере разных заполнителей, а также приведены новые экспериментальные данные по влиянию климатических факторов на прочность трехслойных материалов. Разработанные методики в виде СТО СМК ФАУ «ЦАГИ» по испытаниям представлены в приложения А - Г диссертационной работы.

Актуальность работы

Новые материалы, технологии производства, сложные конструктивные решения и конфигурации ЛА с учетом заданных (зачастую тяжелых) условий эксплуатации, а также высокие стоимости и трудоемкость испытаний вызывают необходимость совершенствования методов получения расчетных характеристик конструкционных материалов и создания (разработки) соответствующих методик расчета, которые смогут обеспечить минимизированную погрешность, надежность и требуемую достоверность получаемых результатов.

Применение новых конструкционных материалов при проектировании и изготовлении ВС должно выполняться на основании требований, изложенных в Нормах летной годности легких (НЛГ-23) и транспортных самолетов (НЛГ-25). Указанные документы определяют общие требования к расчетным характеристикам конструкционных материалов и содержат следующие базовые положения: «Материалы и качество изготовления» (пункт 603) и «Прочностные характеристики материалов и их расчетные значения» (пункт 613).

Описание процедур подтверждения соответствия применяемого материала вышеуказанным установленным требованиям (п. 603 и п. 613) приведено в методах обеспечения соответствия (МОС). В данных документах указаны необходимые типы и объемы испытаний, а также условия окружающей среды, при которых необходимо проверить уровень прочностных характеристик.

В существующей системе нормативных документов за скобками остаются стандарты проведения испытаний, несмотря на то, что описанные в них процедуры проведения испытаний напрямую влияют на уровень получаемых расчетных характеристик. Важность данных документов остается недооцененной до сих пор.

Степень разработанности темы исследования

Проблематика применения сотовых панелей в конструкции ЛА нашла отражение в ряде фундаментальных научных исследований. Так, В.Е. Берсудский и В.Н. Крысин в своих работах [11-12, 55] сосредоточили свое внимание на технологии изготовления сотовых панелей, рассмотрев вопросы анализа влияния геометрии ячеек на жесткость и массу конструкции, подходы к оптимизации

параметров материалов, а также процессов и методов сборки. В работах В.И. Сливинского [4, 89, 90] обоснована эффективность применения сотовых конструкций для объектов и изделий авиационно-космического назначения.

Основы методик проектирования и расчета трехслойных конструкций были заложены во второй половине 20-го века. В работах Ю.А. Гладкова, В.А. Сугакова, И.А. Бригера, К.М. Иерусалимского, [91-96], наряду с расчетом общей прочности, рассматриваются вопросы прочности соединений несущих слоев, прочность сотового заполнителя при смятии и под воздействием сосредоточенных нагрузок, на устойчивость сжатого несущего слоя. Вопросы общей устойчивости трехслойных панелей с сотовым заполнителем рассмотрены в работах А.Я. Александрова, Э.П. Трофимова и Л.И. Куршина [97-102]. В книге В.Ф. Панина [88] рассмотрены существующие методы испытаний трехслойных конструкций по определению прочностных, жесткостных, вибрационных и акустических характеристик.

На сегодняшний момент разработаны типовые требования к характеристикам материалов и конструкций, а также к методам их испытаний на прочность [68, 72-80]. Для обеспечения установленных требований, которым должны соответствовать современные авиационные конструкции, изготовленные из ПКМ необходимо подтверждение прочностных и упругих характеристик материала и элементов конструкций на образцах, вырезаемых из агрегатов (образцы-свидетели) и крупноразмерных конструктивно-подобных образцах (КПО). Результаты испытаний таких образцов учитывают основные технологические особенности формования реальных элементов конструкции из ПКМ, практически не воспроизводимых при исследовании образцов из специально изготовленных технологических панелей. Данные особенности могут существенно влиять на конечные значения механических характеристик образца, а также на разброс их значений [35]. В случае трехслойных панелей, состоящих из обшивок и заполнителя, возникает сложность в обеспечении необходимых допусков по форме и расположению поверхностей образцов (плоскостность и параллельность торцевых кромок), к которым прикладывается нагрузка, что обуславливается различающимися механическими характеристиками обшивок и заполнителя [103, 104]. Также актуальной становится

задача упрочнения нагружаемых торцов при испытании на торцевое сжатие с целью исключения нерасчетного локального смятия образца [30] и обеспечения равномерного перераспределения силового потока от нагружаемых торцов в зачетную область образца [68, 76, 80].

В ряде работ [32, 52-54, 86, 87] исследуется важная проблема накопления влаги в процессе эксплуатации. Экспериментальные исследования по влагонасыщению и дальнейшим прочностным испытаниям представлены в работе [31]. Установлено, что равновесное состояние материала было достигнуто за 16 недель, а снижение его прочности при повышенной температуре составило примерно 50%. Таким образом вопрос поиска перспективного заполнителя, способного обеспечить низкое поглощение влаги или стабильность свойств при влагонасыщении, является по-прежнему открытым.

Проведенное выше рассмотрение позволило определить цель и задачи для диссертационной работы.

Цели и задачи

Цель диссертационной работы – обеспечение требуемой статической прочности элементов конструкции ЛА за счет повышения точности определения расчетных характеристик трехслойных материалов.

В рамках работы были решены следующие задачи:

1. Разработаны методики получения прочностных характеристик трехслойных материалов при различном нагружении, которые будут пригодны как для испытаний специально подготовленных образцов, так и образцов-спутников;

2. Разработана и валидирована математическая модель процесса испытаний для отработки технологического процесса укрепления нагружаемых торцов образца;

3. Разработаны технологические рекомендации по подготовке образцов к испытаниям, вырезанных из реальной конструкции, с целью получения зачетного разрушения и максимально возможного уровня прочностных характеристик;

4. Оработаны методики получения прочностных характеристик трехслойных материалов с перспективными заполнителями (мелкодисперсные сферопластики и

углепластиковые соты). Выполнена оценка характеристик прочности и степени влагопоглощения таких материалов по сравнению с трехслойными материалами, содержащими традиционные заполнители.

Объектом исследования являются авиационные трехслойные панели, а также конструкции с использованием данных панелей, где для внешних слоев используется более прочные материалы (стали, алюминиевые сплавы и композиционные материалы на основе стеклянных, углеродных и кевларовых волокон), а в качестве заполнителя используются как дискретные, так и сплошные заполнители.

Методология и методы исследования

Методологическая основа включает в себя нормативные документы, регулирующие процедуры подтверждения соответствия конструкции ВС нормам летной годности по прочностным критериям, и применяемые в авиационной отрасли методики испытаний элементарных образцов из ПКМ и металлов (ГОСТ, ОСТ, ASTM, ISO, EN, MIL-STD и др.), а также результаты исследований отечественных и зарубежных ученых по прогнозированию статической прочности и долговечности авиационных конструкций из этих материалов. Экспериментальные исследования проводились в Лаборатории центра прочности ФАУ «ЦАГИ» на поверенных электрогидравлических и электромеханических машинах с разными разрывными усилиями. Для фиксации процесса деформирования образцов использовались системы тензометрии, а для неразрушающего контроля - ультразвуковые приборы. Также проводилось расчетное сопровождение экспериментальных работ путем моделирования процесса испытаний с использованием конечно-элементного программного пакета ABAQUS/CAE.

Научная новизна

Научную новизну работы определяют:

- Разработанные методики определения механических свойств трехслойных панелей, которые позволяют повысить достоверность экспериментальных данных, методики с учетом специфики авиастроительной отрасли, выпущены впервые;

- Разработана методология подготовки образцов (вырезанных из реальной конструкции с учетом технологических дефектов), которая позволяет в несколько раз повысить точность результатов и снизить количество незачетных разрушений, а в некоторых случаях - обеспечивает возможность реализации испытаний;

- Получены актуальные экспериментальные данные по прочностным характеристикам современных трехслойных материалов. Проведена оценка зависимости снижения прочности материала от воздействия климатических факторов.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методологии технологической подготовки трехслойных образцов к испытаниям для получения прочностных и упругих характеристик материала, основанной на виртуальном (математическом) моделировании этого процесса.

Практическая значимость работы заключается во внедрении результатов диссертационной работы при выпуске СТО СМК ФАУ «ЦАГИ» и ПАО «Яковлев», а также в применении разработанных методик при обосновании прочности элементов конструкции ЛА в соответствии с ФАП-25 (п.25.613).

На защиту выносятся следующие результаты:

1. «Методика испытания на растяжение материала трехслойных панелей»;
2. «Методика испытания на сдвиг материала трехслойных панелей»;
3. «Методика испытания на сжатие материала трехслойных панелей»;
4. «Методика испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей».
5. Методика подготовки образцов вырезанных из реальной конструкции с учетом возможных технологических дефектов серийного производства.
6. Экспериментальные данные по влиянию климатических факторов на прочностные характеристики трехслойных материалов.

Личный вклад автора заключается в самостоятельной постановке задач и выборе методов исследования, лежащей в основе диссертационной работы. Автор принимал непосредственное участие в разработке, формировании и согласовании программы специальной квалификации материала, лично проводил

экспериментальные исследования и обеспечивал организационное и методическое сопровождение специальной квалификации материала. Результатом проведенной работы, были разработаны и предложены новые методики проведения испытаний трёхслойных материалов (панелей), которые были использованы при получении характеристик материала в рамках работы по обоснованию прочности основных силовых элементов механизации самолета МС-21-300, а также для проекта сверхзвукового гражданского самолета в части поиска перспективных материалов замены. Методики, предложенные автором, могут быть использованы при испытании образцов спутников/свидетелей, результаты испытания таким образом являются более показательными так как учитывают все технологические особенности формования серийной конструкции ЛА.

Достоверность

Достоверность полученных результатов подтверждается контрольными экспериментальными исследованиями с репрезентативным объемом образцов в Лаборатории центра прочности ФАУ «ЦАГИ», а также сравнительными расчетами с применением актуальных систем автоматизированного проектирования (САПР) и математического моделирования методом конечных элементов (МКЭ).

Внедрение результатов работы

Разработанные методики применяются при выполнении работ по определению расчетных характеристик трехслойных панелей в Лаборатории центра прочности ФАУ «ЦАГИ». Результаты работы использованы ПАО «Яковлев» при проведении специальной квалификации основных силовых элементов механизации крыла самолета МС-21-300, а также для проекта сверхзвукового гражданского самолета в части поиска перспективных материалов замены. Акты о внедрении результатов работы представлены в приложении Д.

Соответствие паспорту специальности.

Диссертация посвящена совершенствованию методов получения расчетных характеристик трехслойных материалов для обеспечения статической прочности конструкции ЛА и соответствует паспорту специальности 2.5.13. Проектирование,

конструкция, производство, испытания и эксплуатация летательных аппаратов по следующим пунктам:

- «п.2. Создание теоретической, методической, экспериментальной и производственной базы, позволяющих обеспечить требуемые показатели качества по назначению, надежности, точности, взаимозаменяемости, технологичности, унификации, стандартизации, эргономичности, технической эстетики, патентной чистоты.»;

- «п.3. Создание и отработка принципиально новых конструктивных решений выполнения узлов, систем и ЛА в целом. Исследование их характеристик и оценка перспектив применения.»

Апробация работы

Результаты работы были апробированы при подготовке доказательной документации по сертификации самолета МС-21-300 на соответствие требованиям ФАП-25 (п. 25.613, п.25.571).

Результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях:

- Dassault Systemes Simulia Community Conference 2015, Berlin, Germany;
- 9th European Solid Mechanics Conference (ESMC 2015) 2015, Leganes-Madrid, Spain;
- VI Всероссийская научно-практическая конференция «Принципы и механизмы формирования национальной инновационной системы» 2015, Дубна;
- Научно- практическая конференция молодых ученых 2022, Жуковский ЦАГИ;
- II Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов» 2023, СибНИА Новосибирск;
- XVIII Всероссийская школа-конференция молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» 2024, ИТПМ СО РАН, Шерегеш;
- 3я Международная конференция «Скоростной транспорт будущего: перспективы, проблемы, решения» 2024;

- III Научно-практическая конференция аспирантов 2024, Жуковский;
- IV Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов» 2025, СибНИА Новосибирск.

По результатам работы опубликовано 8 статей из списка ВАК:

1. С.В. Дубинский, И.А. Жаренов, М.В. Павлов, В.М. Ордынцев. Методика определения закономерностей, характеризующих энергии случайных ударных воздействий на конструкцию самолета // Ученые записки ЦАГИ, Т.47, №8, 2016 г;
2. М.В. Павлов, А.В. Панков, А.А. Свиридов. Исследование эффективности критериев при оценке прочности композитных механических соединений // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. №43;
3. М.В. Павлов, А.В. Панков, А.А. Свиридов. Расчётно-экспериментальное исследование механических свойств композитных полуфабрикатов большой толщины // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. №43;
4. В.И. Гришин, М.В. Павлов, А.А. Свиридов. Применение характеристических кривых к оценке прочности металлокомпозитных соединений // Ученые записки ЦАГИ, Т. 54., №6, 2023 г;
5. В.И. Голован, В.И. Гришин, М.В. Павлов, А.А. Свиридов. Исследование механических свойств сотовой панели при испытании на торцевое сжатие с учетом климатических факторов // Ученые записки ЦАГИ, Т. 55., №3. 2024 г;
6. М.В. Павлов, А.А. Свиридов, Е.И. Смагин. К вопросу об испытаниях трехслойных материалов для получения механических свойств// Ученые записки ЦАГИ, Т.54., №6 2024г;
7. М.В. Павлов, С.А. Титов, А.А. Свиридов, А.А. Бурдов. Экспериментальное определение действительных прочностных характеристик элементов трехслойных панелей вырезанных из агрегатов ЛА // Механика композиционных материалов и конструкций, Т. 31., №1, 2025 г;
8. М.Р. Тютин, Л.Р. Ботвина, А.И. Болотников, А.А. Свиридов, М.В. Павлов. Влияние предварительного нагружения на повреждаемость и кинетику разрушения однонаправленного композиционного материала на основе углеродных волокон // Деформация и разрушение материалов. 2025. №10.

1 Аналитический обзор литературных источников

Существующие основные методы производства трехслойных материалов были описаны в научных работах, выдающихся ученых XX века [11-12, 55 и 56]. С тех пор, по мере развития техники и технологии производства, значительно изменился подход к процессу проектирования. Так в работе [2] представлена методология GAP для эффективного проектирования деталей из композитных материалов, рисунок 2. За счет локализации ключевых проблем на ранних стадиях производства она позволяет выбрать правильные решения на начальных этапах проектирования, что способствует минимизации возможных дорогостоящих ошибок и потерь времени в дальнейшем.



Рисунок 2 – Пример интеграции методологии GAP в процесс проектирования для типового проекта [2]

В работах [4-6] детально обоснована технологическая и экономическая эффективность применения сотовых заполнителей и сотовых конструкций для ЛА и изделий ракетно-космической техники. Автор статьи/монографии [5] указывает, что применение высокопрочных сталей, титановых и алюминиевых сплавов, а также ПКМ в традиционных подкрепленных конструкциях, работающих в условиях изгиба и сжатия, часто не приводит к снижению массы изделия, что объясняется тем, что при малых толщинах конструкции из вышеупомянутых материалов они обладают низкими критическими напряжениями потери устойчивости, которые превышают предельно-допустимые.

В работе [20] представлен всесторонний обзор современных подходов к проектированию и производству трехслойных конструкций, представлено описание практически всех видов заполнителей, которые оптимизируют применение этих материалов для разных отраслей промышленности, в том числе при проектировании ЛА, рисунок 3. Рассматриваются актуальные проблемы, а также перспективы развития.

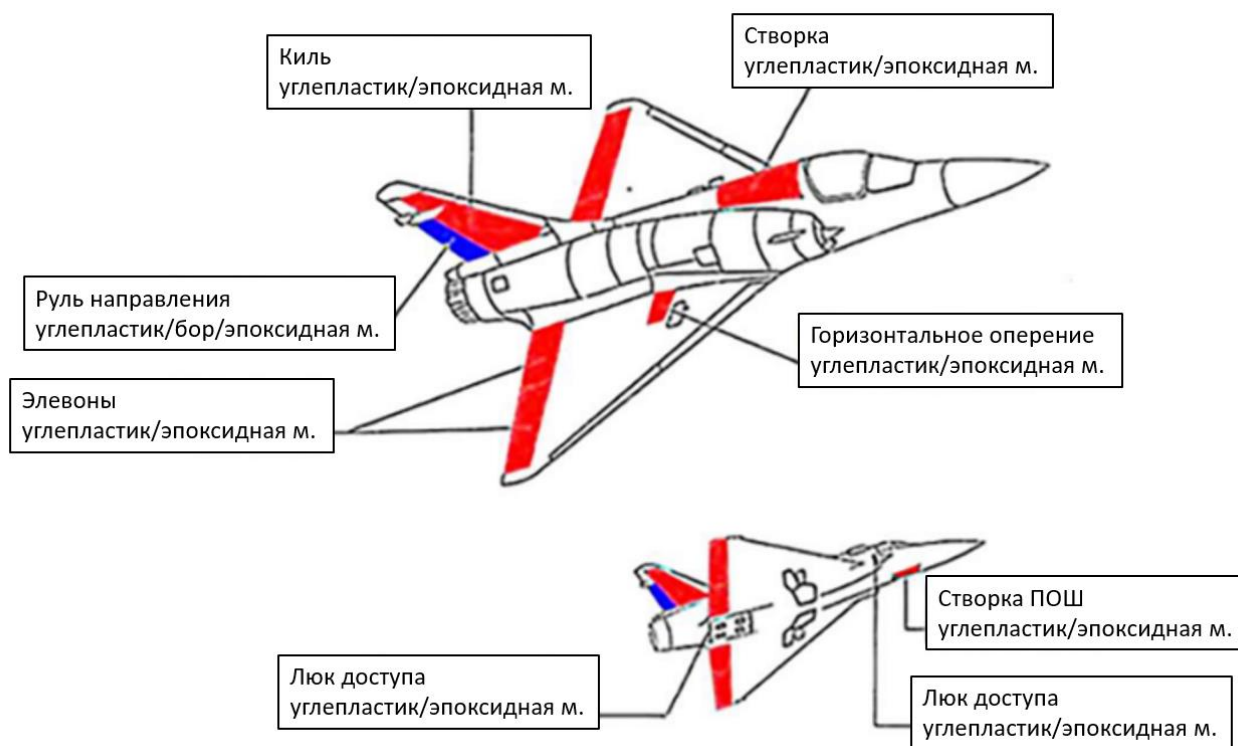


Рисунок 3 – Пример использования различных комбинаций материалов для трехслойных панелей на примере элементов конструкции самолета Dassault Mirage F1 [20]

Инновационное развитие сотовых конструкций за последние два десятилетия привело к появлению многообразия их видов: заполненные, тандемные, иерархические и ауксетические (с отрицательным коэффициентом Пуассона (NPR)). Преимущества и недостатки каждого вида конфигурации заполнителя проанализированы и предложены рекомендации по их внедрению в конструкцию ЛА, основные выводы представлены в работе [42].

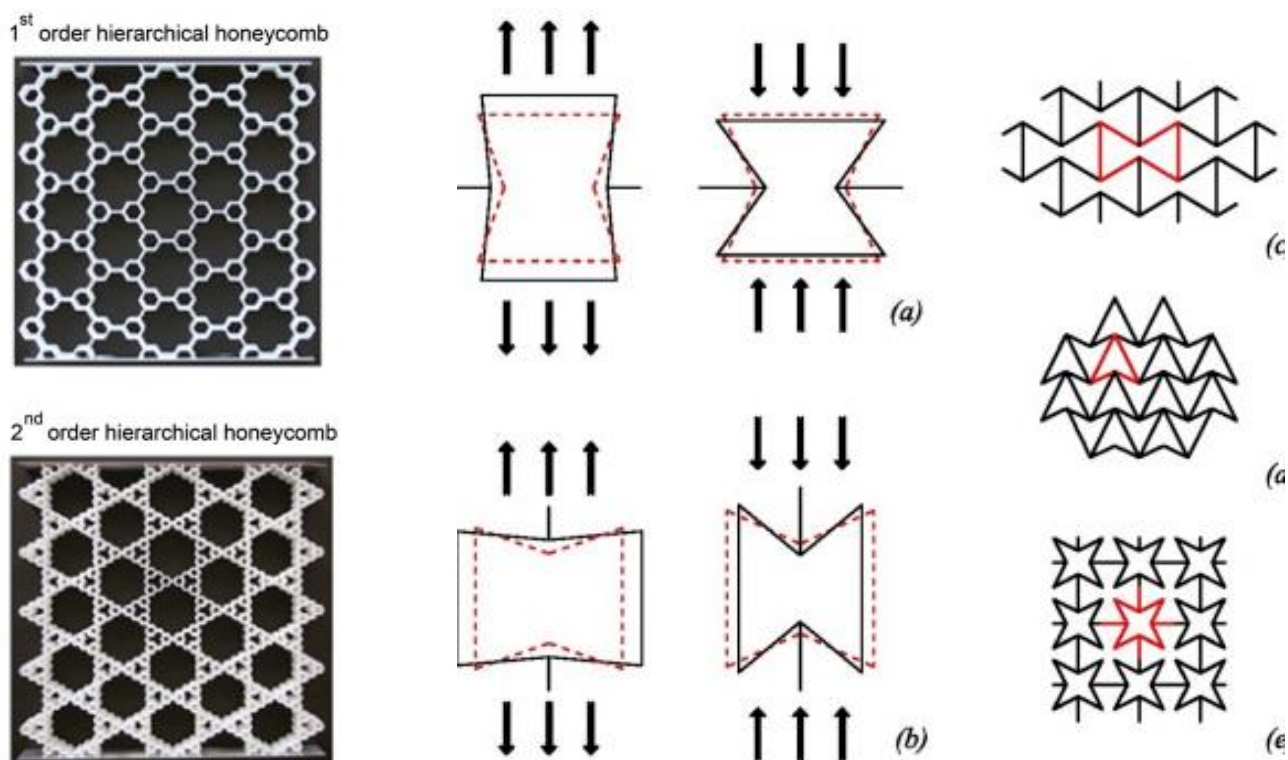


Рисунок 4 – Пример иерархических и ауксетических сотовых структур
заполнителя[42]

В статье [59] представлен обзор современных исследований по разработке и характеристике трехслойных панелей с разными типами заполнителей в том числе гофрированными, пенными и сотовыми. Обсуждаются аспекты связи на границе обшивки - заполнитель, улучшения механических свойств заполнителя (за счет иерархического строения), а также многофункциональные преимущества разных типов заполнителя. Рассматриваются потенциальные области применения, а также перспективные направления дальнейших исследований.

В исследованиях [68] проведен ряд экспериментальных работ по исследованию пенообразных заполнителей и пенообразных заполнителей, усиленных дополнительно эпоксидной решеткой (grid-scored foam или GSF). В результате установлено, что прочность на сжатие для GSF образцов значительно возросла, так же отмечено, что за счет улучшения сцепления обшивок эпоксидным связующим возрастает прочность на сдвиг, в среднем на 38% по сравнению с обычным (PF), не усиленным пенообразным заполнителем, рисунок 5.

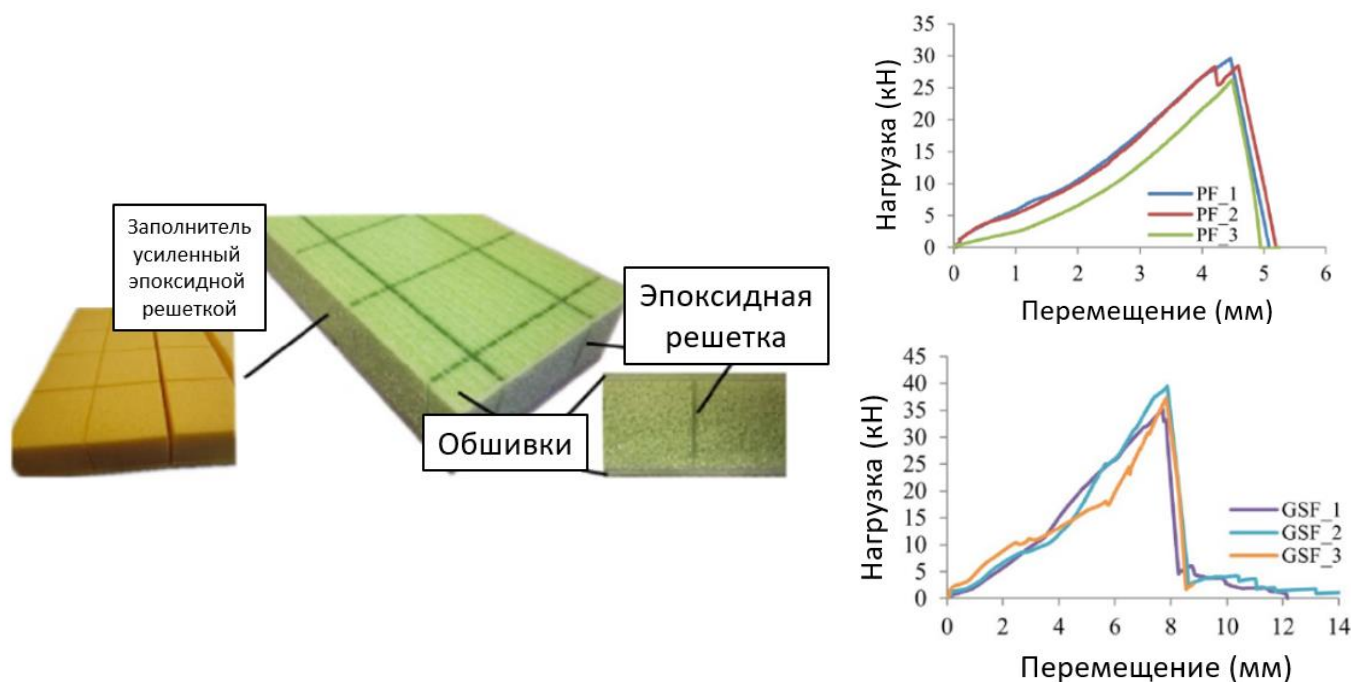


Рисунок 5 – Типовая структура GSF образца. Диаграмма зависимости нагрузка-перемещение для образцов усиленных (GSF) и не усиленных (PF) [68]

Эксплуатационные дефекты и ударные воздействия с дальнейшим образованием повреждений значительным образом влияют на механические и прочностные характеристики трехслойных панелей, в работах [43-51] проведены численные и экспериментальные исследования, проведена оценка влияния каждого вида дефекта на прочность панели. Помимо дефектов, на прочность также влияют климатические условия, такие как повышенная и пониженная эксплуатационная температура, повышенная влажность с последующим накоплением конденсата внутри сотового заполнителя и обшивок, приводящего к постепенному разрушению конструкции. Это явление исследовано в ряде публикаций [52-54].

В статье [60] рассматривается дефект, вызванный вдавливанием сферического бойка на примере трехслойной панели с пенообразным заполнителем. В ходе работ построена конечно-элементная модель с учетом остаточных деформаций и размеров вмятины после вдавливания, которая хорошо согласуется с результатами эксперимента. По заверению автора модель может быть доработана и использована для получения остаточной прочности на растяжение, сжатие и сдвиг после дефекта.

Научный труд [63] является фундаментальным руководством, которое содержит методы аналитического решения задач устойчивости трехслойных

панелей для типовых условий в аэрокосмической области. Предложенные методы включают известные аналитические подходы, доработанные с учетом опыта проведения испытаний, содержат расчетные уравнения, которые подходят для широкого диапазона конфигураций трехслойных панелей. Для ряда случаев приведены реальные данные испытаний для подтверждения рекомендаций.

В работе [14] описаны результаты статических испытаний на сжатие сотовых образцов из горизонтального оперения стабилизатора МиГ-29. В ходе испытаний установлено, что кривые напряжение-деформация, полученные с экстензометра значительно отличаются от кривых полученных методом видеоэкстензометра.

В статье [62] представлены аналитические прогнозы касательно прочности трехслойной панели с ПКМ обшивками и пенным наполнителем при трехточечном изгибе. Установлено, что доминирующей модой разрушения является локальная потеря устойчивости обшивки вследствие пластического сдвига наполнителя под нагрузочным роликом.

Wolf, D. и Zamarin, A в своей работе [19] сосредоточились на определении свойств на сдвиг многослойной панели из ПВХ с закрытыми порами для использования в морских условиях эксплуатации. Для снятия деформаций применялся метод корреляции цифровых изображений, который позволил определить модуль сдвига, место зарождения трещины и дальнейшее ее распространение, а также зафиксировал возникновение вторичных дефектов между наполнителем и клеем, последние не удавалось фиксировать традиционными методами измерений.

В исследованиях [61] проведен экспериментальный анализ нагружений трехслойных панелей с пенопластовым наполнителем из пустотельных шариков разной конфигурации. В ходе испытаний на изгиб установлено, что прочность определяется связью шариков пенного наполнителя между собой, а диаметр шариков не оказывает влияния на результат. Однако в испытаниях на сдвиг, в случае сдвигового разрушения, диаметр оказывается важным параметром, определяющим прочность трехслойной панели.

В работе [67] проводится исследование трех конфигураций сотового заполнителя, изготовленного с использованием метода 3д печати из алюминиевого сплава. Результаты эксперимента показали значительную разницу по разрушающей нагрузке при торцевом сжатии для разных конфигураций сот. Кроме того, в ходе работ было проведено математическое моделирование процессов нагружения при торцевом сжатии, которое подтвердило достоверность результатов моделирования со средней относительной погрешностью 3.3%.

В работе [57] проведен анализ критических нагрузок на изгиб для заполнителя из различных материалов с разным размером ячейки соты, но с одинаковым общим объёмом. Результаты показывают, что с увеличением плотности сот (уменьшение размера соты) прочность на изгиб возрастает. Причем в бумажных сотах механизм разрушения характеризуется наряду с потерей устойчивости и локальными разрушениями стенок сот так же появлением трещин под углом в 45° относительно оси нагружения, рисунок 6.

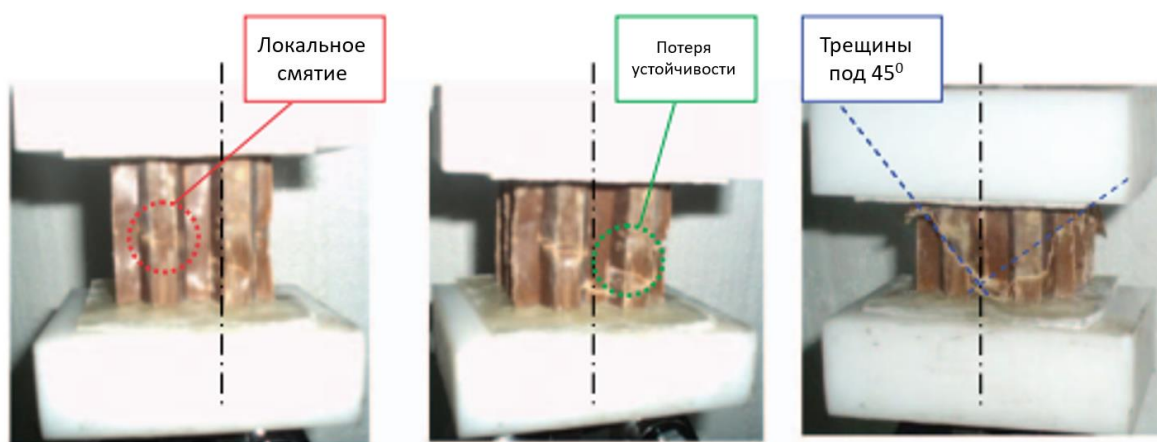


Рисунок 6 – Механизм разрушения бумажных сот [57]

В статье [58] описана новая теория больших деформаций с использованием метода жесткости для расчета поверхности разрушения при действии двухосных напряжений. Установлено что величина напряжений при потере устойчивости стенок заполнителя зависит от плотности и не зависит от геометрии сот, в то время как форма потери устойчивости зависит главным образом от геометрии заполнителя и может рассматриваться как независимый параметр от плотности сот.

В ряде работ применяется метод конечных элементов для расчета многослойных панелей: в исследованиях S. Anandan, G. Dhaliwal, S. Ganguly и K. Chandrashekhara [16] разработана расчетная модель трех точечного изгиба сотовой панели (композитные несущие слои и алюминиевые соты) и проведено сравнение с результатами эксперимента. В работе Yung-Chang Cheng, Huai-Chun Yeh & Cheng-Kang Lee [15] проведено расчетно-экспериментальное исследование сотовых панелей по стандартам ASTM C297, C364 и C365 с дальнейшей оптимизацией сотовых панелей для улучшения весовой эффективности. Авторами в работе [17] были разработаны расчетные модели для определения поведения алюминиевой сотовой конструкции при сжатии, результаты сопоставлены с результатами эксперимента (относительная погрешность моделирования не превышает 18%), рисунок 7.

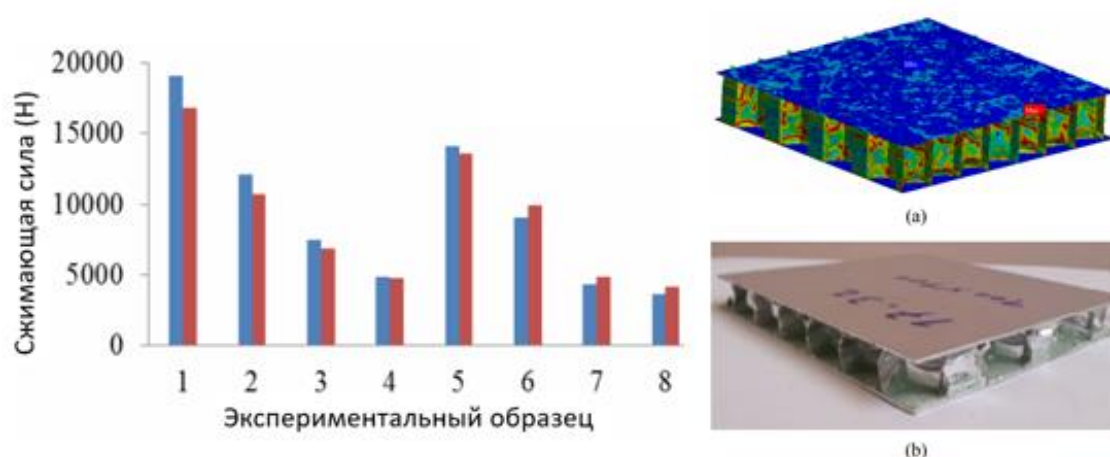


Рисунок 7 – Сравнение результатов расчета (a) и эксперимента (b) [17]

Ученые M. Giglio, A. Gilioli, A. Manes [18] провели испытания и разработали конечно-элементную модель испытаний на трёхточечный изгиб многослойной конструкции с алюминиевыми несущими слоями и сотовым заполнителем типа «Nomex».

Авторы работ [64-65] продемонстрировали процесс разработки математической модели материала заполнителя, которая бы учитывала разные моды разрушения в зависимости от действующих нагрузок, с помощью подпрограмм к ПК Abaqus [66]. Применение указанных пользовательских подпрограмм показало хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Авторы статьи [70] провели экспериментальное, численное и аналитическое исследование композитной трехслойной панели с крестообразным заполнителем при сдвиге. Установлено, что доминирующей модой разрушения трех разных конфигураций является образование расслоений в вершине геометрии «X». Численный анализ методом конечных элементов продемонстрировал хорошую сходимость и позволил подробно исследовать процесс образования сдвиговых деформаций заполнителя.

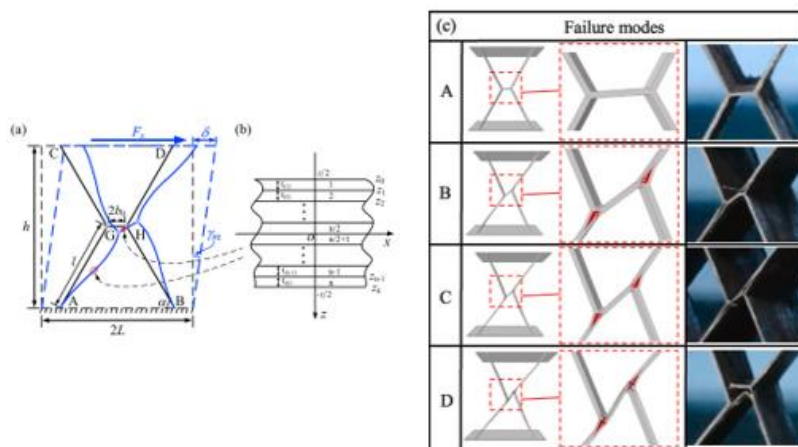


Рисунок 8 – Сдвиговые деформации в вершине, мода разрушения в эксперименте [70]

Обобщая представленные результаты исследований, можно сделать вывод, что подавляющее их большинство сосредоточено на более высоком уровне анализа прочности, а именно: анализ прочности конструктивных элементов, в том числе и из перспективных материалов, построение моделей материалов и виртуальное моделирование отклика конструкции из трехслойных материалов на внешнее воздействие. Используемые расчетные характеристики жесткости и прочности трехслойных материалов принимаются как исходные данные и методические аспекты их получения не анализируются. Соответственно ошибки, полученные при определении характеристик, транслируются напрямую в результаты проводимых расчетов и различных других изысканий, что может приводить к некорректным выводам. Существенным вопросом при обеспечении прочности и долговечности авиационной конструкции является анализ стабильности производственного процесса в соответствии с требованиями НЛГ-25 (п. 25.603, п. 25.605, п. 25.613). С этой же задачей сопряжены исследования деградации свойств трехслойных

материалов в процессе эксплуатации с целью оценки возможности продления срока службы авиационной конструкции. Соответственно на производстве необходимо иметь методику выходного контроля прочностных характеристик, получаемых трехслойных материалов и элементов конструкции. Далее будет показано, что существующие стандарты испытаний, не позволяют решать указанные задачи в полной мере. В частности, процедуры испытаний регламентированы не полностью, отсутствуют четкие требования к размерам используемых приспособлений, не приведены рекомендации по подготовке образцов, вырезаемых из натуральных конструкций, которые как правило имеют кривизну и иные технологические особенности, отличающие их от плоских образцов.

В рамках данной работы делается попытка совершенствования существующей нормативной базы в части получения расчетных характеристик трехслойных материалов с целью снижения разброса (рассеяния) экспериментальных данных и минимизации влияния процедуры проведения испытаний на получаемые данные. Результаты работы направлены на повышение достоверности предварительных оценок устойчивости и прочности элементов авиационных конструкций, выполненных из трехслойных материалов. Детальное описание достигнутых результатов представлено в следующих главах.

Выводы к разделу 1

Выполненный аналитический обзор более ста литературных источников (учебных и справочных изданий, монографий, статей, докладов и т.п.) позволил выделить направления проведенных и перспективных научных исследований в области производства трехслойных материалов, особенностей проектирования элементов конструкций ЛА в том числе с применением панелей из ПКМ, а также проблемы, возникающие при испытаниях по определению параметров прочностных характеристик конструкционных материалов.

Изученная, проанализированная, систематизированная и обобщенная информация фундаментальных трудов отечественных и зарубежных ученых, инженеров и специалистов послужила научно-методической базой для проведения исследований, проведенных в настоящей работе.

2 Разработка методик испытаний

Благодаря выдающимся показателям удельных характеристик (прочность и жесткость при минимальной массе), трехслойные материалы обусловили свою особую роль в авиационной и космической отраслях, где снижение массы напрямую ведет к повышению тактико-технических характеристик, включая топливную эффективность. Если первоначально их применение ограничивалось второстепенными конструкциями, то с развитием технологий и материалов их использование распространилось на основные силовые элементы ЛА.

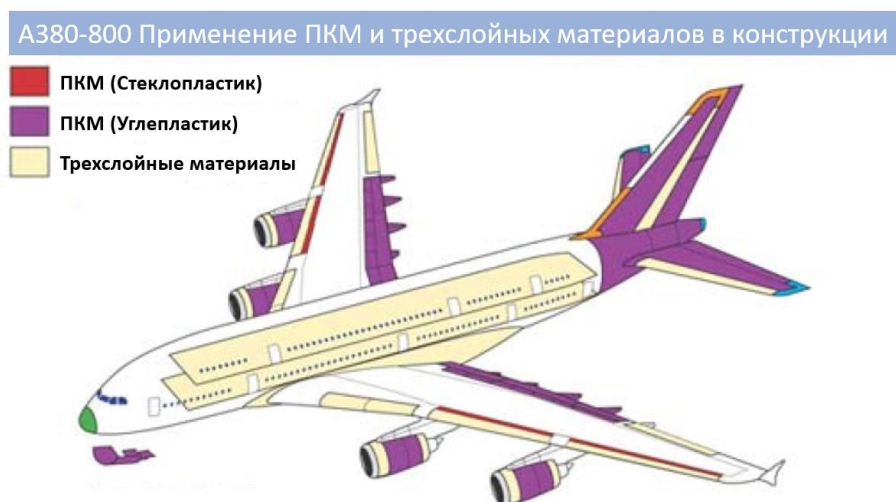


Рисунок 9 – Пример применения ПКМ и сотовых материалов в конструкции самолета A380-800

Если рассматривать гражданский пассажирский самолет, то трехслойные материалы зачастую используются в механизации крыла и стабилизатора (предкрылках, элеронах, интерцепторах), фюзеляже, капотах мотогондолы двигателя, и створках шасси, а также в интерьерах самолета (панели пола, потолка, боковые панели). Дополнительно в отрасли вертолетостроения трехслойные материалы используют в конструкции лопастей несущего и вспомогательного винтов. [1,4].

Для сертификации материалы, используемые в конструкции ЛА, проходят испытания и определяются расчетные значения. Данный вопрос стоит очень остро, так как начальный опыт определения расчетных значений показал, что прочностные характеристики ПКМ имеют повышенное рассеяние данных, что в конечном итоге

приводит к снижению базисных значений расчётных характеристик. Для характеристик статической прочности величина коэффициента вариации экспериментальных данных считается приемлемой при уровне не выше 10%.

Основными проблемами для достижения такого коэффициента вариации экспериментальных данных является: сложное строение ПКМ с характерной анизотропией свойств по направлениям; сложная механика деформирования и разрушения; большое количество мод разрушений. Указанная специфика должна в обязательном порядке учитываться в отраслевых методиках на проведение экспериментальных исследований.

Согласно Методикам определения соответствия (МОС) к п.613 НЛГ 23 и 25, методы и подходы получения расчетных значений характеристик ПКМ силовых элементов, должны быть унифицированы. Это обеспечивает сопоставимость экспериментальных данных, необходимую для обеспечения прочности и долговечности конструкции, с обязательными процедурами систематизации и обобщения отечественного и зарубежного опыта.

Общепринятый объем испытаний для композиционных материалов можно считать устоявшимся в авиационной промышленности, однако трехслойные материалы в явном виде до настоящего времени не учтены в нормативной базе и требуемый объем испытаний при проведении специальной квалификации зафиксировано не установлен. По аналогии с ламинатами, минимальный необходимый объем испытаний можно обобщить в виде матрицы испытаний представленной в таблице 1.

Таблица 1 Предлагаемый минимальный объем для матрицы испытаний специальной квалификации трехслойных материалов

№ п/п	Вид нагружения Методика испытания	Условия среды и число испытаний на партию препрега				Число испытаний
		CTD	RTD	ETW	ETD	
1	Растяжение ГОСТ Р 56783-2019/ ASTM C 297-04	5x6	5x6	5x6	5x6	120
2	Сдвиг ГОСТ Р 56651-2015/ ASTM C 273-00	5x6	5x6	5x6	5x6	120
3	Сжатие ГОСТ Р 56816-2016/ ASTM C 365-00	5x6	5x6	5x6	5x6	120
4	Торцевое сжатие ГОСТ Р 56809-2015/ASTM C 364-00	5x6	5x6	5x6	5x6	120

Для проведения испытаний и получения расчетных характеристик прочности трехслойных материалов в отечественной и зарубежной нормативной базе существует большое количество стандартов. Практика их применения, возникающие проблемы и варианты их решения представлены в следующих разделах работы.

2.1 Существующие методики испытаний

В настоящее время основными стандартами по проведению испытаний трехслойных материалов являются ГОСТ, ASTM, ISO, EN и MIL-STD. Основные методики испытаний для трехслойных материалов приведены в таблице 2. Указанные стандарты относятся к категории общепромышленных и не всегда учитывают особенности и специфику авиационной отрасли.

Таблица 2 Стандарты испытаний трехслойных материалов

Название метода испытаний	ГОСТ Р	ASTM C	ISO	MIL-SDT
Растяжение трехслойной панели	56783-2019	297-04	-	STD-401B
Сдвиг трехслойной панели	56651-2015	273-00	1922-18	
Сжатие трехслойной панели	56816-2016	365-00	-	
Торцевое сжатие трехслойной панели	56809-2015	364-00	-	

Опираясь на справочную информацию, содержащуюся в вышеуказанных стандартах, проведен анализ проблем методического обеспечения испытаний трехслойных материалов, сформулированы значимые аспекты процедур таких испытаний и предложены подходы по совершенствованию нормативной базы в сфере практического применения.

2.2 Испытания на растяжение

Испытание на растяжение позволяет определять предел прочности трехслойных материалов в направлении перпендикулярном плоскости панели. Испытания на растяжение материала трехслойной панели регламентируются стандартами: ГОСТ Р 56783-2019 и ASTM C 297-04. Оба этих стандарта являются практически идентичными, однако к преимуществам отечественного следует отнести более детализированное описание допустимых режимов разрушения образцов в процессе испытаний.



Рисунок 10 – Примеры оснасток для испытания трехслойных материалов на растяжение

Стандарты ГОСТ Р 56783-2019 и ASTM C 297-04 регламентируют процедуры испытаний как трехслойных материалов с обшивками, так и чистого заполнителя без обшивок (во втором случае образец вклеивается в испытательную оснастку).

При испытании чистого заполнителя дополнительная подготовка поверхностей не требуется. Важно обеспечить общие правила - поверхность для склеивания должна быть: чистая, сухая и обезжиренная.

Однако при испытании трехслойных панелей с обшивкой процесс подготовки – вклеивания образца в оснастку может значительным образом повлиять на результат. Здесь следует отметить, что стандарты не содержат описания данной процедуры.

Поверхности для вклеивания могут быть подготовлены разными способами, наиболее распространенными являются: механическая шлифовка и пескоструйная обработка. Под каждый из вариантов обработки выбирается определенный размер зерна абразива в зависимости от материала и паспорта используемого клея. Для пескоструйной обработки помимо размера зерна абразива выбирается величина давления струи абразива. Например, для обшивок из углепластика такое рекомендуемое давление составляет 3 бара, а для сплавов алюминия и стали давление должно быть равно 6-7 бар. После шлифования или пескоструйной обработки поверхность следует отчистить ацетоном, для удаления пыли и

остаточного материала. К выбору клеевой композиции важно подходить максимально ответственно, так как не каждая клеевая композиция способна обеспечить разрушение в зачетной зоне [21]. В работе [22] приведены результаты исследований разных методов подготовки поверхностей образцов и представлены экспериментальные данные по разрушающей нагрузке для каждого из методов подготовки.

В ФАУ «ЦАГИ» была разработана специальная оснастка для испытания по аналогии с той, что представлена в эскизах стандартов ГОСТ/ASTM, которая в дальнейшем была регламентирована как типовая в стандарте СТО СМК, рисунок 11.

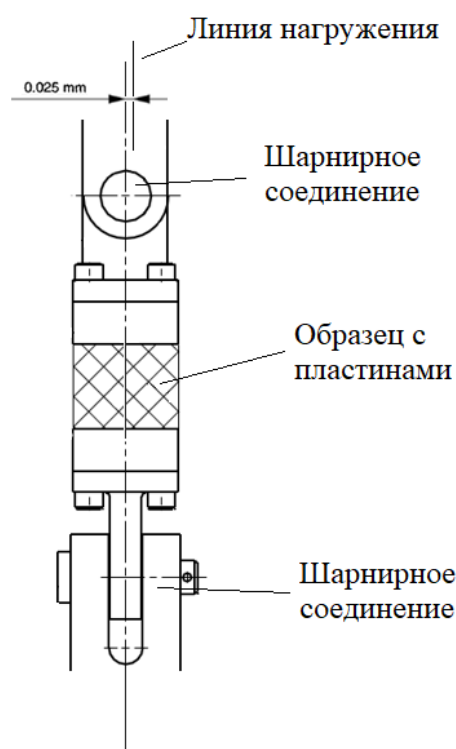


Рисунок 11 – Оснастка для испытаний образцов на растяжение по СТО СМК 7-157-2023 ФАУ «ЦАГИ»

В соответствии с рекомендацией раздела 7.2 стандарта ASTM C 297-04 оснастка должна выполнять условия самоцентрирования для исключения возникновения эксцентричных нагрузок. Данная рекомендация была учтена в разработанной оснастке за счет шарнирных соединений, обеспечивающих ее самовыравнивание. Сборка автоматически центрируется под действием собственной массы.

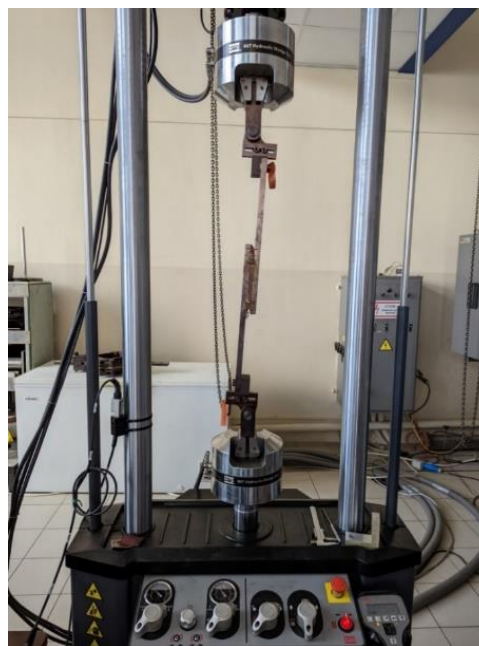
Обобщая и систематизируя информацию в приведенных выше стандартах ГОСТ/ASTM, разработаны методические рекомендации по проведению испытаний образцов трехслойных панелей на растяжение, чертежи испытательной оснастки, а также инструкции по подготовке поверхностей образца и его вклейки в испытательную оснастку, ставшие составными частями соответствующей методики (СТО СМК 7-157-2023 ФАУ «ЦАГИ»).

2.3 Испытания на сдвиг

Механические свойства на сдвиг являются одними из основных при проектировании конструкций из трехслойных ПКМ. Испытание позволяет определить предел прочности и модуль сдвига материалов трехслойной панели при нагружении обшивок панели разнонаправленными напряжениями, параллельными осям обшивок. Основным стандартом для проведения испытаний на сдвиг является стандарт ГОСТ Р 56651-2015 (аналог стандартам ASTM C 273-00 и ISO 1922-2018). Стандарты ГОСТ и ASTM являются предельно схожими, к их общим недостаткам можно отнести следующее: представлены только общие рекомендации относительно выбора размеров образцов; отсутствует какое-либо описание оснастки для испытания, представлена только схема нагружения.



а)



б)

Рисунок 12 – Оснастка для испытания на сдвиг сотового заполнителя:
а) схема нагружения по ASTM C 273-00, б) оснастка по СТО СМК 7-158-2023 ФАУ «ЦАГИ»

В качестве рекомендаций в пункте 5.3 стандарта ASTM C 273-00 говорится: «Образец должен быть жестко закреплен к нагружающим пластинам. Толщина нагружающих пластин может варьироваться в зависимости от испытываемых образцов, длина нагружающих пластин должна быть выбрана, так что бы обеспечить прохождение растягивающей или сжимающей нагрузки через противоположные углы трехслойной панели».

В этом стандарте представлено достаточно скудное описание по расположению датчика деформаций. Хотя для правильного определения характеристик модуля упругости на сдвиг очень важно расположить датчик максимально близко к центру образца. Так же может быть использован метод цифровой корреляции изображений (DIC), который позволяет получить поля деформаций и более полную картину о характере и механике разрушения трехслойной панели. В работе [19] указывается, что данные полученные с датчика деформации подходят для быстрой оценки или оценки в инженерных целях так как такая оценка, является достаточно консервативной, погрешность которой может достигать ~20%.

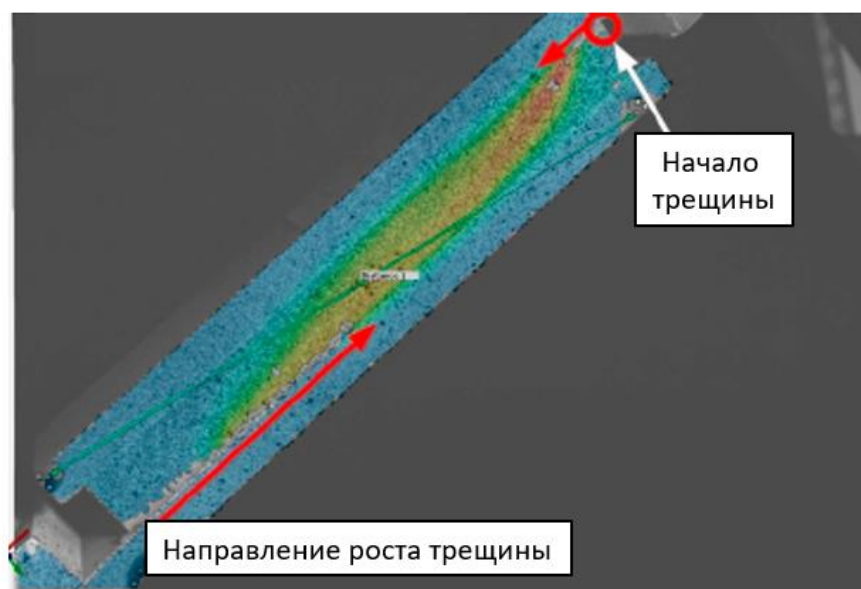


Рисунок 13 – Поля деформаций, полученные методом цифровой корреляции изображений, при сдвиге трехслойной панели [19]

Как и в стандарте испытаний на растяжение ASTM C 297-04, в стандарте на сдвиг ASTM C 273-00 отсутствует описание методики подготовки поверхностей для вклейки образца, а также сама процедура вклейки образца в оснастку.

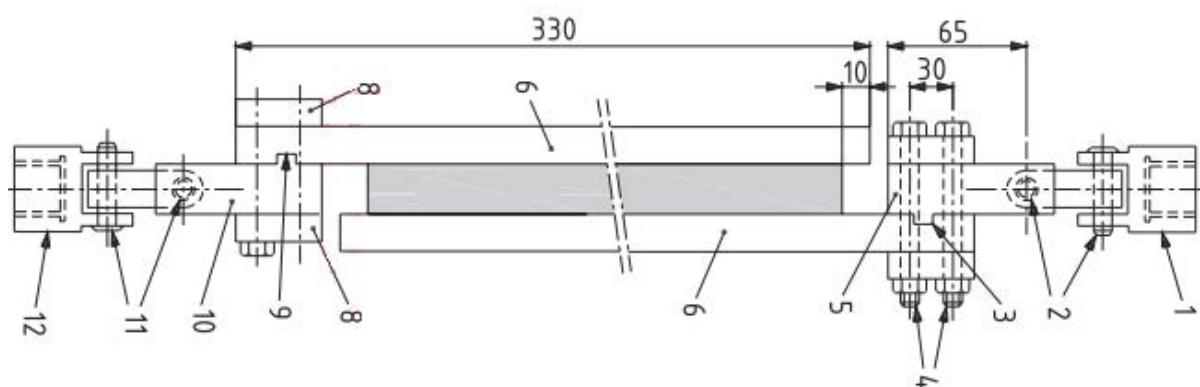


Рисунок 14 – Оснастка для испытания на сдвиг по ISO 1922-2018

Стандарт ISO 1922-2018 [25] является не универсальностью, так как может применяться при испытаниях образцов заполнителя без обшивок, в авиастроительной отрасли такие конструкции практически не встречаются, поэтому далее в работе он не рассматривается.

В целях совершенствования методологии и оборудования для испытаний, в ФАУ «ЦАГИ» была разработана оснастка для испытания трехслойных панелей на сдвиг, рисунок 15.

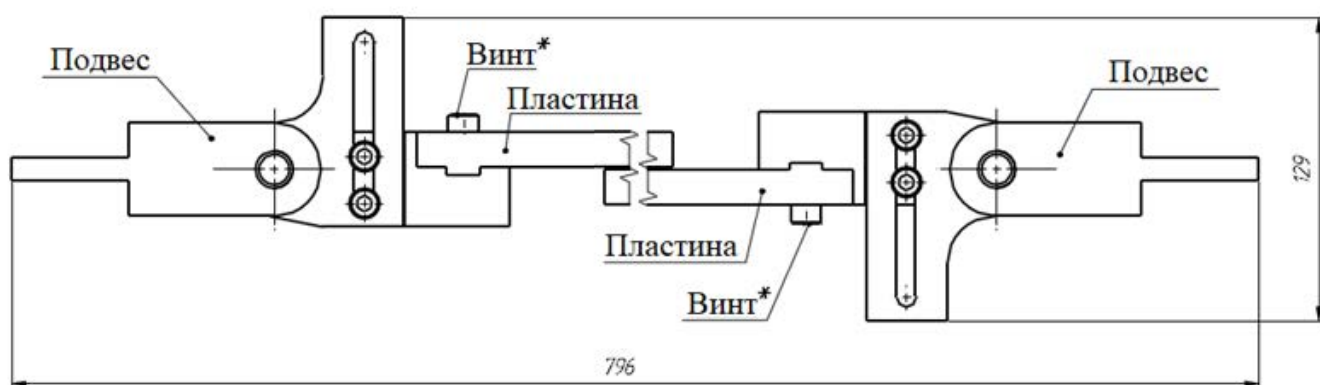


Рисунок 15 – Общий вид оснастки для испытания трехслойных панелей на сдвиг

В отличие от эскиза аналогичной оснастки по стандарту ASTM C 273-00, принципиально изменены (доработаны) подвесы оснастки, которые позволяют унифицировать данную оснастку под различные величины толщин заполнителей трехслойных панелей, рисунок 16. Болтовое соединение позволяет изменять положение подвеса относительно нагружающих пластин в широком диапазоне и тем самым смещать нагружающую линию в зависимости от толщины заполнителя.

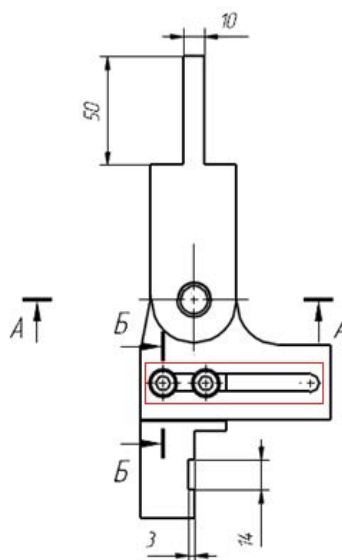


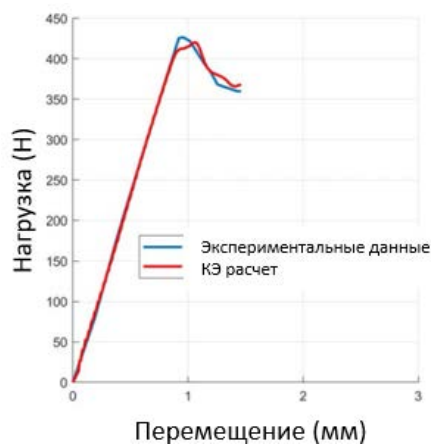
Рисунок 16 – Доработанные подвесы оснастки

2.4 Испытания на сжатие

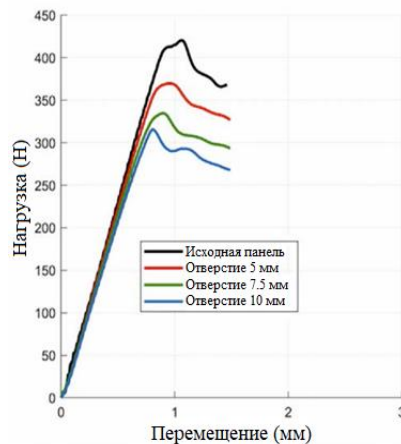
Испытания на сжатие материала трехслойной панели позволяют определять предел прочности при сжатии в направлении перпендикулярном плоскости панели. Испытания на сжатие регламентируются стандартами ГОСТ Р 56816-2016 и ASTM C 365-00.

В пункте 4.3 стандарта ASTM C 365-00 указано, что для снятия деформаций в процессе эксперимента требуется предварительное засверливание образца, рисунок 18, которое в свою очередь является инициатором вносимого дефекта. Так в работе [26] изучается два типа дефектов: дефект от вдавливания (по Бринеллю, метод вдавливания шарика) и дефект от отверстия. Отмечено, что оба дефекта влияют на моду разрушения. Тем не менее, начало разрушения трехслойной панели с дефектом зачастую происходит от образования трещины на ее нижней поверхности, то есть вероятность разрушения трехслойной панели с дефектом от отверстия гораздо выше, чем при дефекте от вдавливания. Дополнительно, долговечность трехслойной панели с дефектом в виде отверстия значительно ниже чем у панели с дефектом по Бринеллю. Авторами работы [27] проведены расчетно-экспериментальные исследования, которые показали значительное снижение разрушающей нагрузки при наличии повреждения образца в виде отверстия. Результаты исследований подтвердили предположение о том, что уровень деградации прочности образца находится в явной зависимости от размера его повреждения. Например, отверстие

диаметром 5 мм снижает разрушающую нагрузку на 8%, по сравнению с таким же неповрежденным образцом, а наличие отверстий диаметром 7.5 мм и 10 мм в идентичных трехслойных панелях обуславливало снижение величин разрушающей нагрузки на 12.5% и 17.5%, соответственно.



а)



б)

Рисунок 17 – Деградация прочности при наличии отверстия [27]

- а) результаты сравнения расчетной КЭ модели и эксперимента,
- б) сравнение результатов нагружения исходной панели и с дефектом 5-10мм

В дополнение к рекомендации по предварительному засверливанию образца стандарт ASTM C 365-00, предписывает использование достаточно сложной и дорогостоящей оснастки для размещения датчика деформаций на испытательной машине. На рисунке 18 представлен типичный пример такой оснастки в виде монолитной колонны сложной конфигурации из стального сплава, предназначенная для проведения ограниченной серии специальных испытаний.

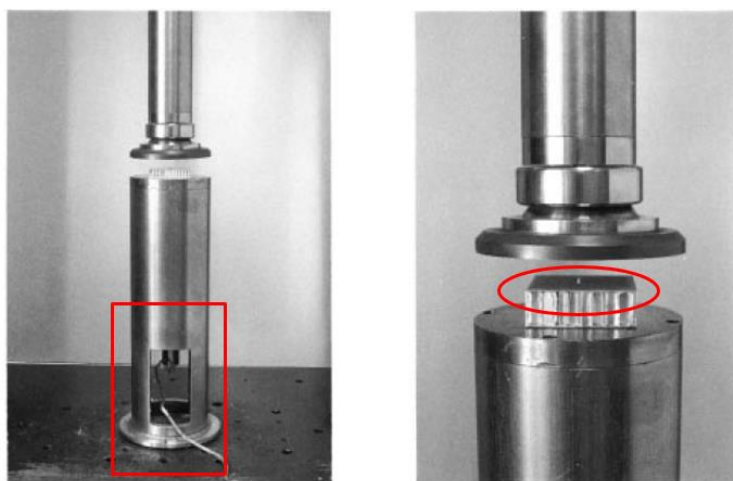


Рисунок 18 – Оснастка для выполнения испытаний по стандарту ASTM C 365 (красным цветом выделено место расположения экстензометра/засверливания)

В работе [28] проведены экспериментальные исследования трехслойных панелей, вырезанных из элементов конструкции маневренного самолета (после налета 10 000 ч).

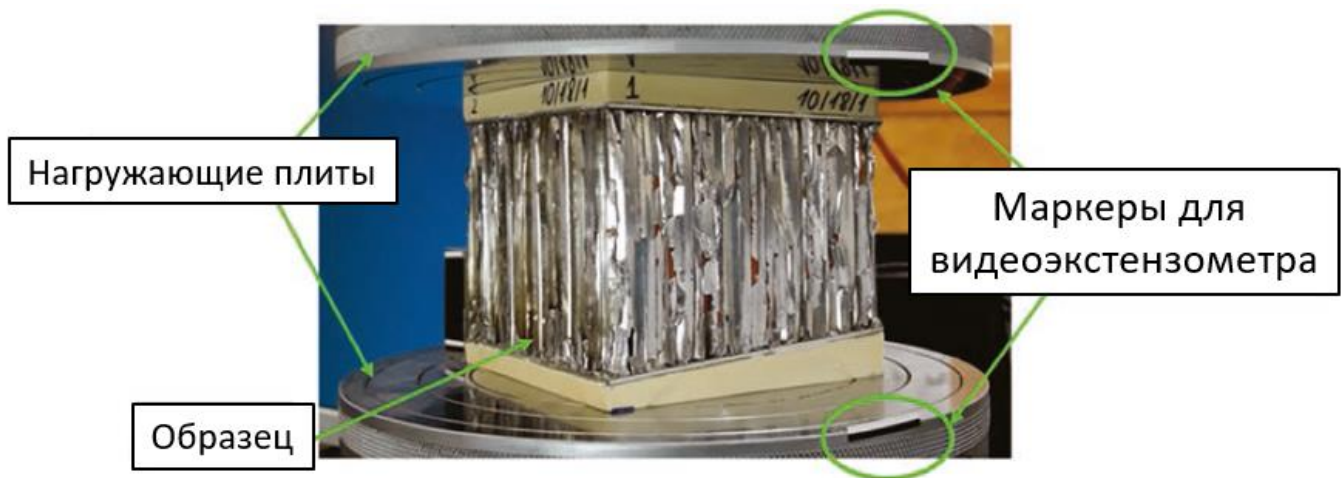


Рисунок 19 – Схема нагружения образца

В процессе проведенных экспериментальных работ данные по деформации образца снимались с датчика деформаций (экстензометра), а также с помощью видеоэкстензометра по точкам, рисунок 19. Установлено, что данные, полученные с экстензометра завышают значения деформаций примерно на 20% по сравнению с аналогичными данными с видеоэкстензометра, таким образом занижая эффективный модуль упругости, Рисунок 20.

Так же можно заметить в статье проводятся испытания реальной сотовой конструкции, которая имеет значительную кривизну, для компенсации чего, авторами был предложен метод реализации нагружения через специальные выравнивающие подкладки из пластика.

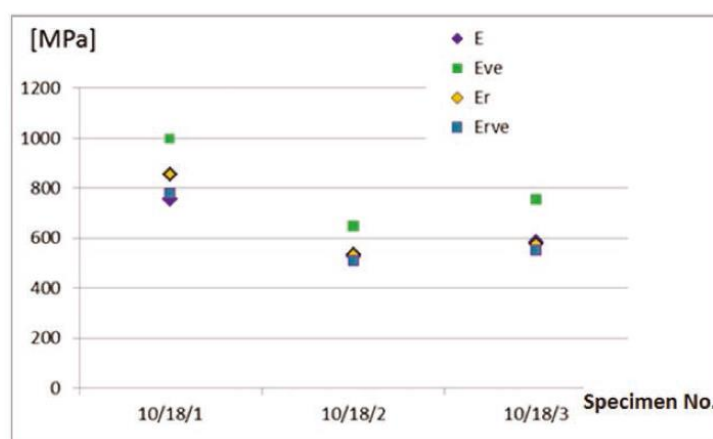


Рисунок 20 – Модуль упругости на сжатие E , E_{VE} – заполнитель, E_R , E_{RVE} – образец

Учитывая недостатки существующих стандартов ГОСТ Р 56816-2016 и ASTM C 365-00, с целью снижения погрешности экспериментальных данных, трудоемкости и ресурсных затрат при испытаниях в ФАУ «ЦАГИ» разработан стандарт СТО СМК 7-159-2023 по испытаниям материала трехслойных панелей при сжатии. Предложена оригинальная оснастка, исключая необходимость внесения нежелательных дефектов в испытываемые образцы, рисунок 21.

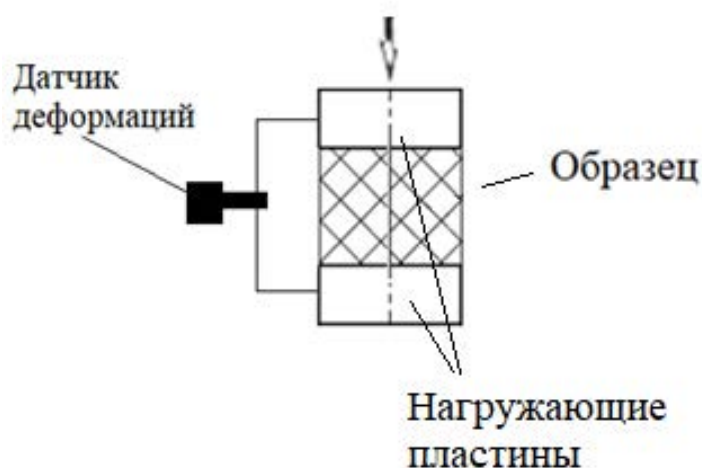


Рисунок 21 – Схема расположения датчика деформаций в соответствии с СТО СМК 7-159-2023 ФАУ «ЦАГИ»



Рисунок 22 – Образец в испытательной машине с датчиком деформаций

Для нагружения образца применяются пластины из стали марки 30ХГСА (размер пластин: 100x100 мм, толщина: 20 мм). Датчик деформаций располагается с боковой стороны от сборки. На торцевых поверхностях нагружающих пластин

выполнены выемки (зенковкой материала пластин), предназначенные для ножей датчика и обеспечивающие надежный контакт между датчиком и исследуемым объектом не внося погрешность в измерения.

2.5 Испытания на торцевое сжатие

Испытания на торцевое сжатие позволяют определить предел прочности трехслойной панели в направлении параллельно обшивкам. Основными стандартами для этого типа испытаний являются ГОСТ Р 56809-2015 и ASTM C 364-00. Данные стандарты являются достаточно схожими, и повторяются в большинстве своих положений. К основным недостаткам содержания данных стандартов можно отнести отсутствие описания оснастки для испытаний, а также очень приближенное описание мод разрушения.

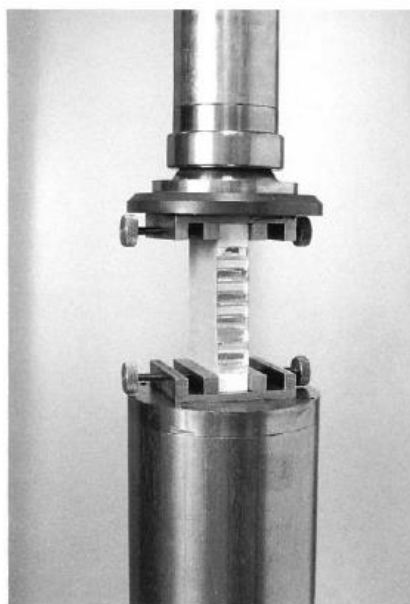


Рисунок 23 – Пример иллюстрации оснастки для испытаний в стандарте ASTM

В разделе 5.2.1.3 стандарта MIL-STD-401B [68] упоминается что, для исключения местного смятия на торцах образца и последующего незачетного разрушения трехслойной панели, необходимо выполнить следующее условие: «...нагружаемые стороны заполнителя могут быть усилены слоем связующего или другого материала...», однако технология и критерии, по которым должно быть выполнено такое упрочнение – отсутствуют в данном документе.

В разделе 3 этой работы представлены результаты численного моделирования методом конечного элемента для поиска решения проблемы незачетного

разрушения. Подходы к решению этой проблемы описаны в работах [81-82], где методика упрочнения применяется для образцов свидетелей (образцов-спутников), вырезанных из реальной конструкции механизации крыла среднемагистрального пассажирского самолета. Следует отметить, что испытания образцов свидетелей (образцов-спутников) позволяет получить наиболее эффективные прочностные характеристики материала, изготовленного в процессе серийного производства с учетом реального набора всех технологических дефектов конкретного производства.

Авторы работы [30] использовали стандарт ASTM C 364-00 для определения свойств гибридной трехслойной панели с армированным сотовым блоком. При этом они установили, что армирование трехслойных панелей алюминиевой сеткой позволяет повысить устойчивость панели к повреждениям, а также предотвратить отслоение обшивок от заполнителя и местную потерю устойчивости. Полученные расчетные и экспериментальные результаты показали хорошую сходимость, рисунок 24.

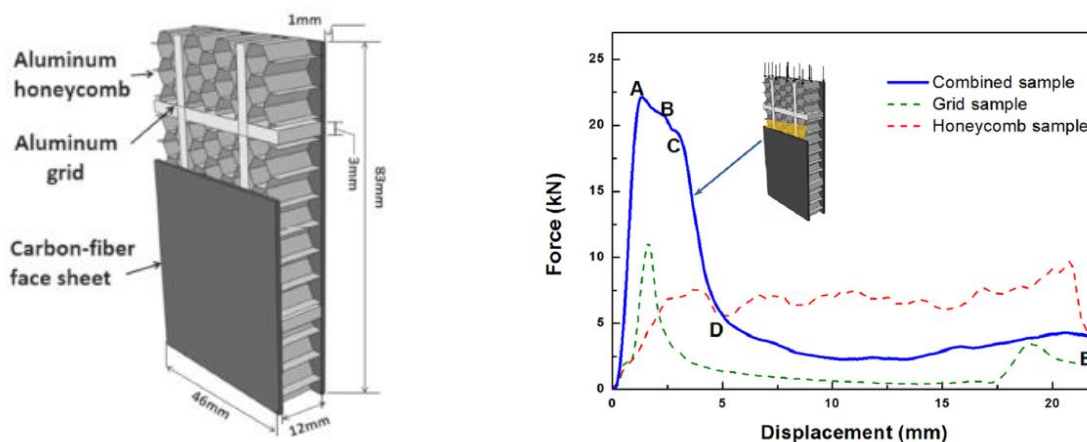


Рисунок 24 – Оценка прочности гибридных сотоблоков с армированием[30]

Выполнив анализ вышеприведенных исследований, с учетом отмеченных недостатков действующих стандартов ГОСТ Р 56809-2015 и ASTM C 364-00, в ФАУ «ЦАГИ» при участии автора проведен комплекс работ по совершенствованию методов испытаний трехслойных панелей при торцевом сжатии и изготовлению соответствующей оснастки для проведения испытаний, рисунок 25. Результаты которых послужили основой созданного стандарта СТО СМК 7-160-2023 ФАУ «ЦАГИ».



Рисунок 25 – Образец в испытательной оснастке по СТО СМК 7-160-2023

По материалам результатов исследований, представленных в настоящей главе, выполнен анализ действующих стандартов испытаний, который позволил сформировать критерии оценки изложенных в стандартах положений и выделить ключевые недостатки существующей базы по каждому виду испытаний, а также обобщить их в наглядной форме, таблица 3.

Таблица 3 Обобщенные результаты анализа положений действующих стандартов ГОСТ и ASTM

Критерий оценки	Вид испытаний			
	Растяжение	Сжатие	Торцевое сжатие	Сдвиг
Процедура подготовки образцов	- Процедура вклейки отсутствует	+/- Есть значительные пробелы	- Процедура укрепление торцов отсутствует	- Процедура вклейки отсутствует
Геометрия	- Нет рекомендаций относительно выбора геометрии	- Нет рекомендаций относительно выбора геометрии	+/- Есть значительные пробелы	- Нет рекомендаций относительно выбора геометрии
Испытательная оснастка	+/- Отсутствуют данные	+	- Отсутствуют данные	- Отсутствуют данные
Измерение деформаций	- Схема отсутствует	- Дорогостоящая оснастка, нанесение дефекта образцу	- Схема отсутствует	- Эскиз, без рекомендаций
Примечание «+» - соответствует, «-» - не соответствует				

Для оценки существующих положений стандартов выделены следующие критерии оценки:

-«Процедура подготовки образцов» - наличие рекомендованного порядка подготовки образца (инструкции, руководства, технологии) подробно объясняющий порядок подготовки образца перед проведением конкретного вида испытаний;

-«Геометрия» - наличие рекомендаций и требований по выбору правильных размеров образца для получения корректных результатов испытаний;

-«Испытательная оснастка» - наличие всех необходимых описаний (схем, чертежей, иллюстраций, технических условий) необходимых для изготовления оснастки для конкретного вида испытаний;

-«Измерение деформаций» - наличие рекомендаций и описаний (схем, чертежей, иллюстраций) по технологии проведения метрологических процедур для получения представительных результатов испытаний.

Вышеуказанный набор критериев фактически является минимально-необходимым перечнем обязательных требований к разрабатываемым методам, методикам и стандартам испытаний по определению требуемых характеристик прочности для элементов конструкции ЛА и послужил основой для совершенствования существующей нормативной базы, которое стало одной из основных целей настоящей работы.

Обобщенные данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что ни один из существующих нормативных документов не соответствует набору сформированных критериев и не может в полной мере успешно применяться для определения расчетных характеристик и обоснования статической прочности трехслойных материалов в элементах конструкции ЛА.

Также следует учитывать, что для авиационной отрасли эталонным считаются значения механических свойств с коэффициентом вариации в пределах 10%, установлено, что рассмотренные методики ввиду присущих им ограничений демонстрируют значительно больший разброс данных ~45%. Кроме того, для ряда испытаний фиксируются незачетные разрушения, значения которых не могут быть использованы в дальнейшем. Важным ограничением является то, что действие

существующих стандартов не распространяется на конструктивно-подобные образцы, вырезанные из конструкции ЛА. Следовательно, эти методики не позволяют учитывать технологические дефекты, возникающие в ходе серийного формования реальной конструкции.

Выводы к главе 2

Проведен анализ материалов по результатам ранее проведенных исследований и обзор основных стандартов проведения испытаний для получения расчетных характеристик трехслойных материалов.

Сформирован набор критериев оценки изложенных в стандартах положений, который фактически стал минимально-необходимым перечнем обязательных требований к совершенствуемым методам, разрабатываемым по теме настоящей работы методикам и стандартам испытаний по определению заданных характеристик прочности трехслойных материалов используемых для элементов конструкции ЛА.

Выделены ключевые недостатки существующей нормативной базы по каждому виду испытаний, обобщение которых предопределяет необходимость модернизации действующих стандартов для успешного применения их для определения расчетных характеристик и обоснования статической прочности трехслойных материалов в элементах конструкции ЛА.

3 Методика упрочнения нагружаемых торцов при торцевом сжатии

В соответствии со стандартами ГОСТ Р 56809-2015 и ASTM C 364-00 разрушение торцов образца, которое происходит на удалении менее, чем размер одной толщины трехслойной панели от нагружаемого торца образца, является незачетным, рисунок 26.



Рисунок 26 – Незачетное разрушение образца при торцевом сжатии

В стандартах [68, 76, 80] указано, что для испытания некоторых материалов требуется предварительное упрочнение нагружаемых торцов. В целях изучения данного аспекта обеспечения испытаний в данной главе проведено расчетно-экспериментальное моделирование методом конечных элементов для поиска оптимальной глубины упрочнения нагружаемых торцов образца, а также проведены исследования возможных границ применения данного способа подготовки образцов для прочностных испытаний в зависимости от толщины трехслойной панели.

3.1 Математическая модель

Для моделирования ПКМ существует достаточно обширное [15, 17, 49-51, 64, 107-110] количество подходов, критериев и т.д., практически их можно классифицировать по разным признакам: масштабу рассмотрения, целям моделирования и используемым методам. В настоящей работе модель материала ПКМ характеризуется линейной упругой связью между компонентами тензора напряжений и тензора деформаций до начала образования повреждений. Для описания поведения пакетов и отдельных слоев ПКМ используется модель

ортотропного материала. Определяющие соотношения линейной упругости ортотропного ПКМ в данном случае определяется заданием технических констант вдоль соответствующих осей изотропии, а именно: три модуля упругости E_1, E_2, E_3 ; коэффициенты Пуассона $\nu_{12}, \nu_{13}, \nu_{23}$; модули сдвига G_{12}, G_{13}, G_{23} . Технические константы определяют матрицу податливости следующим образом:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu_{21}/E_2 & -\nu_{31}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{12}/E_1 & 1/E_2 & -\nu_{32}/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{13}/E_1 & -\nu_{23}/E_2 & 1/E_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{23} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

Величина ν_{ij} в физической интерпретации характеризует коэффициент Пуассона, который определяет поперечную деформацию в направлении j при нагружении в направлении i . В общем случае, величины ν_{ij} и ν_{ji} не равны: они связаны соотношением: $\nu_{ij}/E_i = \nu_{ji}/E_j$.

Для использования соотношений ортотропной упругости в численном решении необходимо выполнить условия материальной устойчивости, а именно:

$$\begin{aligned} E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{13}, G_{23} &> 0; \\ |\nu_{12}| &< (E_1/E_2)^{1/2}; \\ |\nu_{13}| &< (E_1/E_3)^{1/2}; \\ |\nu_{23}| &< (E_2/E_3)^{1/2}; \\ 1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13} &> 0. \end{aligned}$$

В случае, когда левая часть неравенств, стремиться к нулю, материал проявляет свойство несжимаемости. С использованием соотношения $\nu_{ij}/E_i = \nu_{ji}/E_j$, второе, третье, и четвертое условия можно выразить как:

$$\begin{aligned} |\nu_{21}| &< (E_2/E_1)^{1/2}; \\ |\nu_{31}| &< (E_3/E_1)^{1/2}; \\ |\nu_{32}| &< (E_3/E_2)^{1/2}. \end{aligned}$$

ПКМ материал обладает достаточно сложной механикой разрушения, которая остается недостаточно изученной до сих пор. Для оценки прочности ПКМ

разработан ряд подходов, основанных на различных критериях разрушения. Как правило, эти критерии относятся к отдельному монослою и базируются на экспериментальных данных, полученных при испытаниях типовых образцов на растяжение, сжатие и сдвиг. Критерий разрушения определяет критические комбинации напряжений (деформаций) приводящие к разрушению монослоя.

Для отслеживания явлений разрушения и развития разрушения в настоящей работе использовался критерий Хашина [69], который имеет следующий вид:

$$\sigma_y > 0, \left(\frac{\sigma_y}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 \geq 1 \quad (3.2)$$

$$\sigma_y < 0, \left(\frac{\sigma_y}{Y_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 \geq 1 \quad (3.3)$$

$$\sigma_x > 0, \left(\frac{\sigma_x}{X_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 \geq 1 \quad (3.4)$$

$$\sigma_x < 0, \left(\frac{\sigma_x}{X_c}\right)^2 \geq 1 \quad (3.5)$$

$$\sigma_x < 0, \left(\frac{\sigma_x}{X_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xy}}{S_{xy}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 \geq 1 \quad (3.6)$$

$$\sigma_z > 0, \left(\frac{\sigma_z}{Z_t}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 \geq 1 \quad (3.7)$$

$$\sigma_z < 0, \left(\frac{\sigma_z}{Z_c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{xz}}{S_{xz}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{yz}}{S_{yz}}\right)^2 \geq 1 \quad (3.8)$$

В критерии Хашина прочность волокна и матрицы оцениваются отдельно, если в результате оценки текущих и критических напряжений критерий равен 1, значит произошло разрушение по данной моде. Данная модель материала использована в дальнейших расчетных исследованиях по разработке методики упрочнения нагружаемых торцов и продемонстрировала хорошую сходимость.

3.2 Исследования влияния изменения глубины упрочнения

В ходе исследований выполнено математическое моделирование процессов нагружения стандартных трехслойных образцов для торцевого сжатия. Конечно-элементный анализ выполнен в программном комплексе ABAQUS/CAE [66]. При моделировании приняты ряд условий и допущений, а именно:

- обшивки трехслойного образца моделируются объемными оболочечными восьмиузловыми элементами типа SC8R;

- для сотового заполнителя используются плоские четырех узловые элементы типа S4R;

- контакт между обшивками и сотовым заполнителем учитывается как постоянно склеенный, посредством Эйлераво-Лагранжевых контактных элементов при моделировании клеевого слоя;

В качестве объекта исследования рассматривается стандартный трехслойный образец для испытания на торцевое сжатие, рисунок 27.

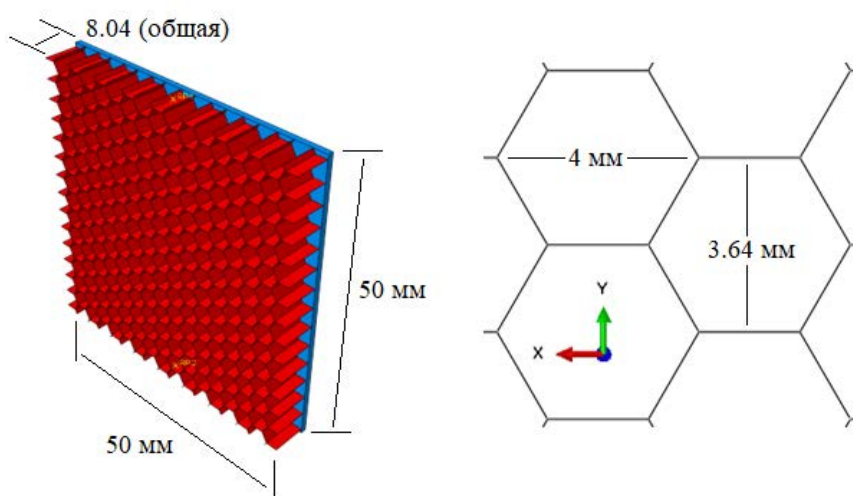


Рисунок 27 – Общая геометрия образца, геометрия сотового заполнителя

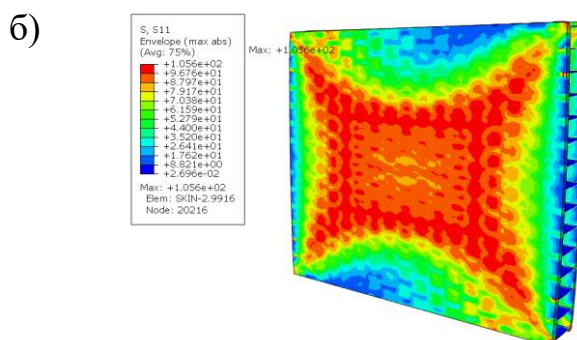
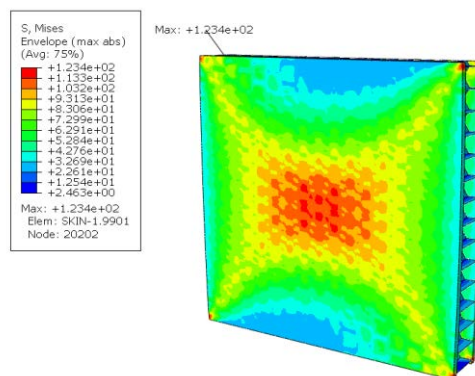
Образец нагружается посредством приложения распределенной нагрузки по верхнему торцу и полного закрепления с противоположного (нижнего) торца, что повторяет условия нагружения в эксперименте, рисунок 28. Решается задача статического сжатия в нелинейной постановке, с оценкой максимальных критических напряжений в направлении s_{11} и, максимальных напряжений по Мизесу, а также отслеживается разрушение с использованием критерия Хашина [69].



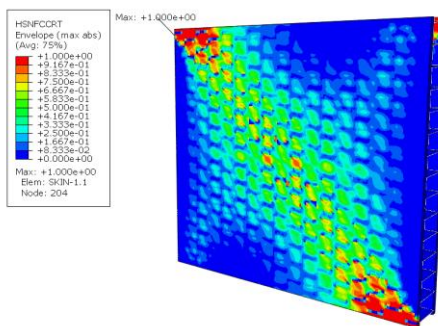
Рисунок 28 – Схема нагружения образца в МКЭ и эксперименте

По результатам математического моделирования процессов нагружения получено распределение напряжений для образца с неупрочненными торцами, рисунок 29. Установлено, что напряжения в направлении s11 полностью идентичны распределению по Мизесу. При этом максимальные напряжения концентрируются около нагружаемого торца, что совпадает с инициацией повреждения по критерию Хашина для моды сжатия волокна. В данном случае разрушение образца происходит при нагрузке равной 3750 кгс и перемещении нагружаемого торца - 1.09 мм.

Рисунок 29 – Распределение а) максимальных напряжений по а) Мизесу, б) в направлении s11. в.) выполнение критерия Хашина.



В)



Как было указано выше, данное разрушение является незачетным так как происходит около нагружаемого торца (на удалении менее, чем размер одной толщины от нагружаемого торца образца). В целях получения зачетного случая разрушения по стандарту было выполнено упрочнение торцов образца путем локального удаления сот в зонах нагружаемых торцов и заполнения освободившихся полостей клеевым компаундом. Таким образом, для дальнейших исследований были использованы три модели с разной глубиной укрепления, рисунок 30.

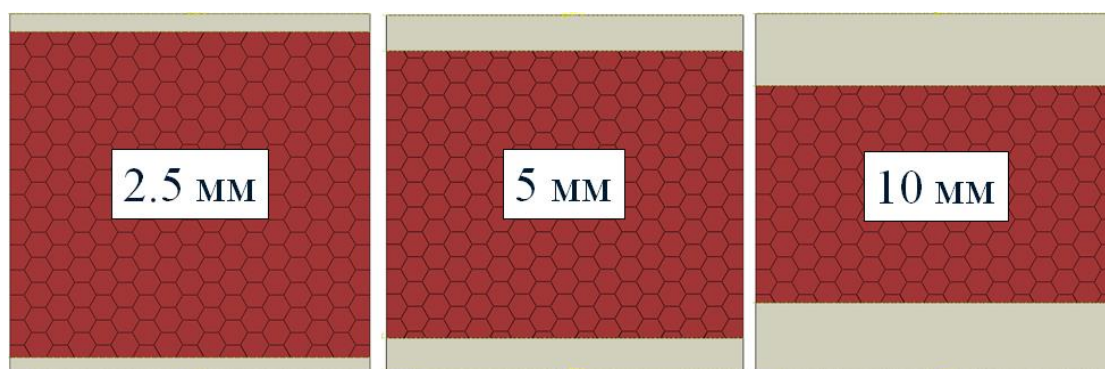


Рисунок 30 – Варьирование глубины укрепления торцов в МКЭ моделях

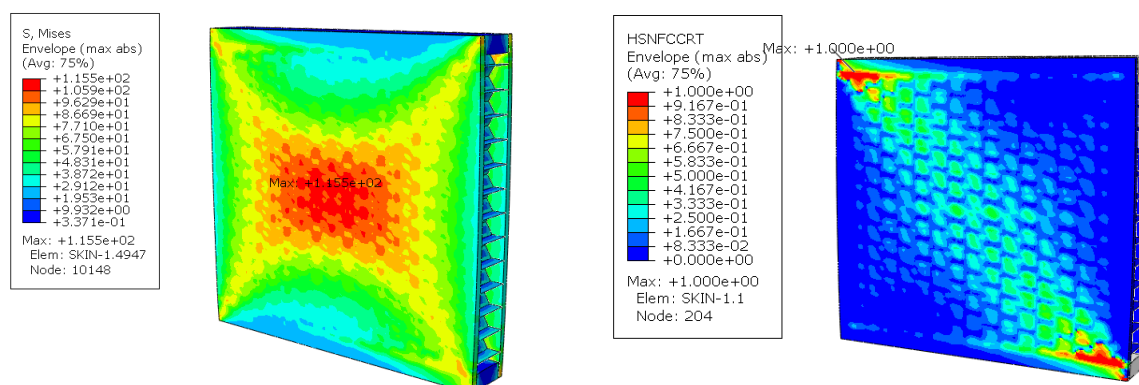


Рисунок 31 – Распределение максимальных напряжений и выполнение критерия Хашина для модели с упрочнением 2.5 мм.

При сравнительном анализе влияния укрепления на характер распределения максимальных напряжений (рисунок 29 и 31) установлено, что даже небольшое по глубине укрепление торцов существенно меняет характер распределения напряжений, смещая концентрацию максимальных напряжений к центру образца. В данном случае предполагаемое место разрушения образца по критерию Хашина смещается на 2.5 мм от края, то есть на величину глубины укрепления торца. При этом разрушение образца происходит при нагрузке равной 3802 кгс и перемещениях -1.11 мм.

В процессе дальнейших исследований выполнено математическое моделирование процессов нагружения образцов с укреплением 5 и 10 мм, соответственно. Получены распределения максимальных напряжений и место инициации повреждения по критерию Хашина для этих моделей, рисунок 32 и 33.

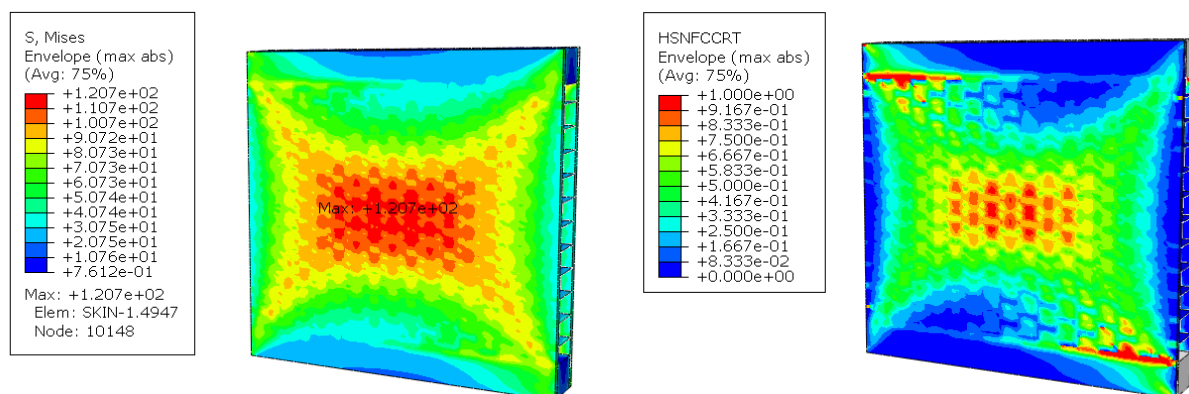


Рисунок 32 – Распределение максимальных напряжений и выполнение критерия Хашина для модели с упрочнением 5 мм.

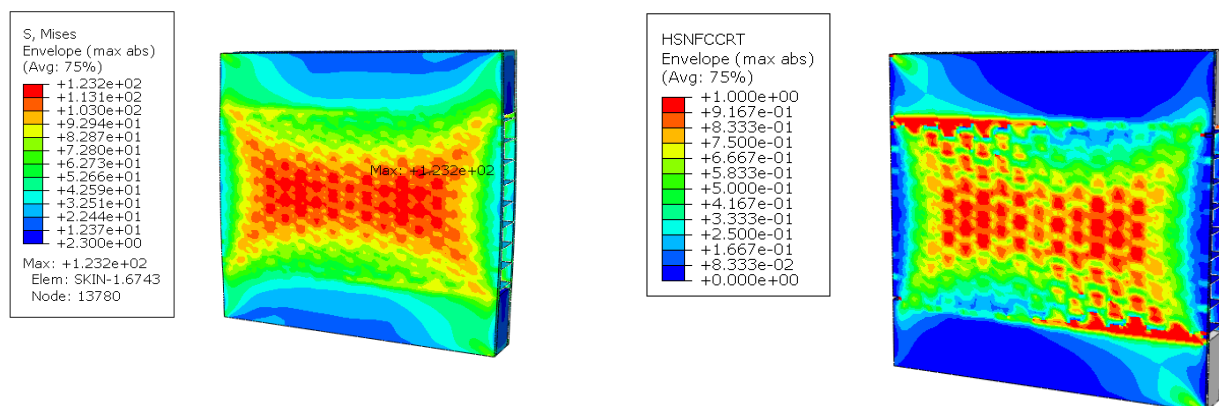


Рисунок 33 – Распределение максимальных напряжений и выполнение критерия Хашина для модели с упрочнением 10 мм.

Установлено, что разрушение образца с укрепленными торцами на глубину 5 мм происходит при нагрузке равной 3992 кгс, и перемещениях- 1.21 мм, а разрушение образца с укрепленными торцами на глубину 10 мм происходит при нагрузке равной 4486 кгс, и перемещениях- 1.32 мм.

Обобщением результатов выполненного расчетного исследования была построена зависимость «нагрузка-перемещение» для всех образцов, рисунок 34.

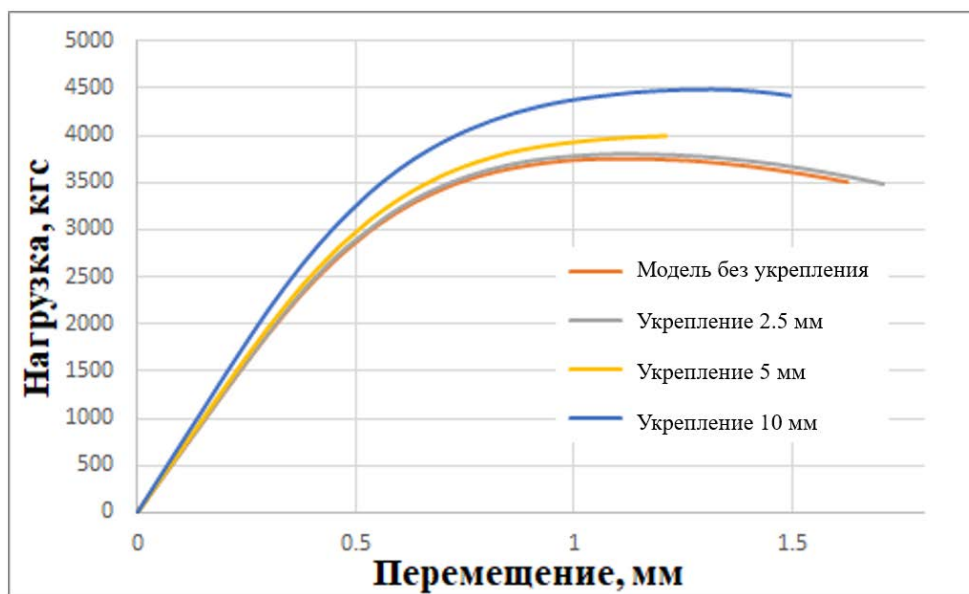


Рисунок 34 – Диаграмма зависимости «нагрузка-перемещение» для моделей с разной глубиной укрепления торцов

Выявлена характерная особенность деформирования моделей образцов при торцевом сжатии, рисунок 34: исходная модель (без укрепления торцов), и модели с глубиной укрепления торцов 2.5 мм и 5 мм демонстрируют примерно одинаковую жесткость, а модель с упрочнением 10 мм становится значительно более жесткой. Следовательно, увеличение глубины укрепления торцов свыше определенного предела оказывает существенное влияние на упругие свойства образца и приводит к завышению величины разрушающей нагрузки.

При сравнении расчетных моделей и экспериментальных данных по разрушающей нагрузке установлено, что разрушающая нагрузка модели с глубиной укрепления 5 мм имеет наименьшее расхождение со средним значением полученным экспериментальным путем, рисунок 35.

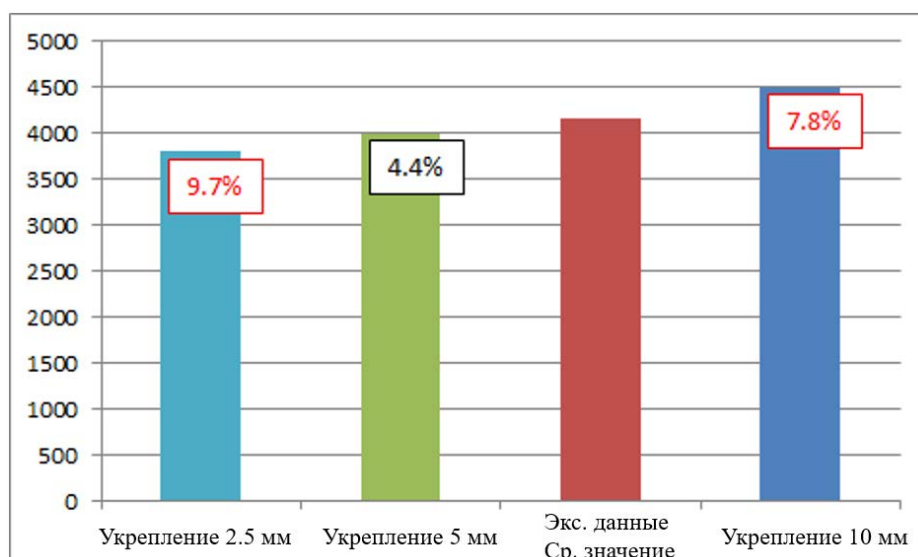


Рисунок 35 – Расчетные и экспериментальные значения разрушающей нагрузки при торцевом сжатии.

По результатам проведенных расчетно-экспериментальных исследований установлено, что минимизация глубины укрепления торцов обеспечивает наибольшее подобие упрочненного и исходного образцов, но чрезмерно малая величина глубины укрепления снижает нагрузку, при которой происходит смятие торцов образца. На этом основании, в результате оптимизации выбрано значение глубины укрепления торцов равное ~ 5.0 мм, которое обеспечивает концентрацию максимальных напряжений в центральной части и как следствие с большой вероятностью может вызвать разрушение образца в центральной рабочей зоне, а также близкие к исходным неупрочненным образцам упругие характеристики, что сходится с результатами, полученными в ходе испытаний образцов с укрепленными торцами, рисунок 36.



Рисунок 36 – Разрушение образцов с глубиной укрепления - 5 мм в результате эксперимента

3.3 Определение предельной толщины исходных образцов для реализации упрочнения

В связи с тем, что толщина трехслойных материалов может сильно варьироваться в конструкции ЛА, зачастую возникает необходимость в определении прочностных характеристик при значительных толщинах трехслойных материалов.

В разделе приведены результаты конечно-элементного моделирования трехслойной панели на торцевое сжатие с ранее выбранной оптимальной глубиной укрепления нагружаемых торцов при различных размерах общей толщины панели (от 3 до 80 мм). Основной целью решения поставленной задачи стало определение граничных значений толщины трехслойной панели, при которых данная методика позволяет достоверно определять упругие и прочностные характеристики с разрушением в зачетной зоне образца. Для решения задачи были построены модели которые варьировали толщины трехслойной панели от 3 мм до 80 мм, рисунок 37.

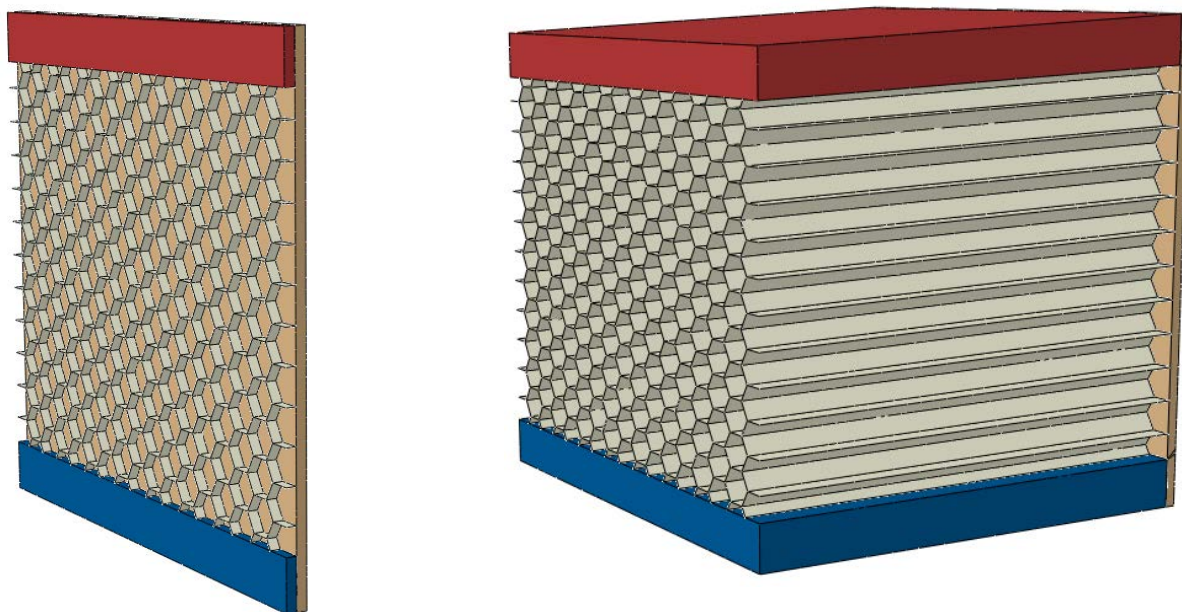


Рисунок 37 – Варьирование толщины трехслойного образца при расчетно-экспериментальных исследованиях

Схема и условия нагружения были полностью аналогичны ранее представленным в разделе 3.2.

В результате нагружения трехслойных панелей была построена диаграмма зависимости разрушающей нагрузки от толщины панели, рисунок 38.

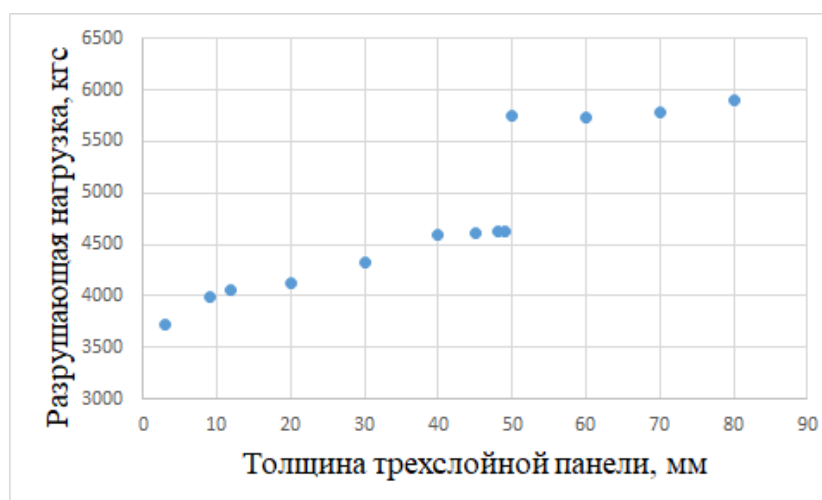


Рисунок 38 – Зависимость толщины трехслойной панели от разрушающей нагрузки

Полученная зависимость демонстрирует тенденцию линейного возрастания разрушающей нагрузки (от 3700 до 4600 кгс) с увеличением толщины (от 3 до 49 мм) трехслойной панели. При дальнейшем увеличении толщины, до величины примерно равной 50мм происходит резкий скачок разрушающей нагрузки до значения ~5700 кгс, дальнейшее увеличение толщины обуславливается незначительным (линейным) ростом. Аналогичная закономерность поведения замечается при построении диаграммы зависимости «перемещение нагружающего торца- толщина трехслойной панели», рисунок 39.

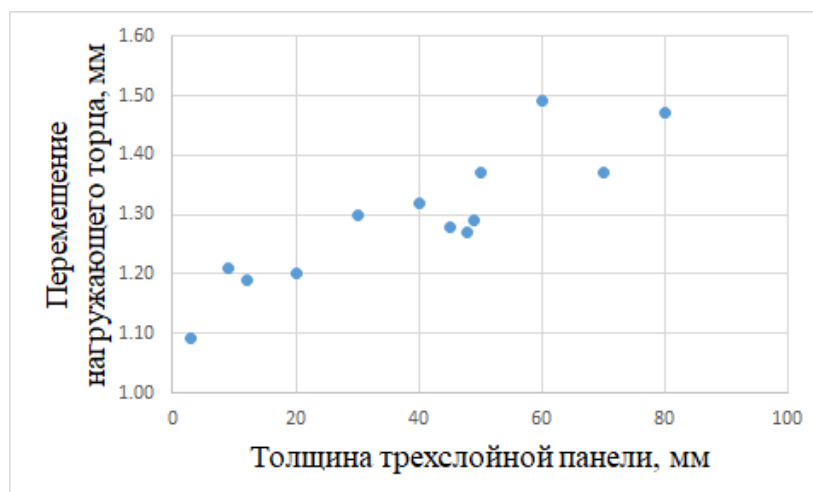


Рисунок 39 – Зависимость перемещение нагружаемого торца от толщины трехслойной панели

Обобщая результаты расчетов установлено, что при переходе от толщины 49 мм к 50 мм происходит резкое кардинальное перераспределение максимальных напряжений. Модели с толщинами от 3 мм до 49 мм демонстрируют схожее

распределение, которое заключается в концентрации напряжений преимущественно в центральной части, рисунок 40.

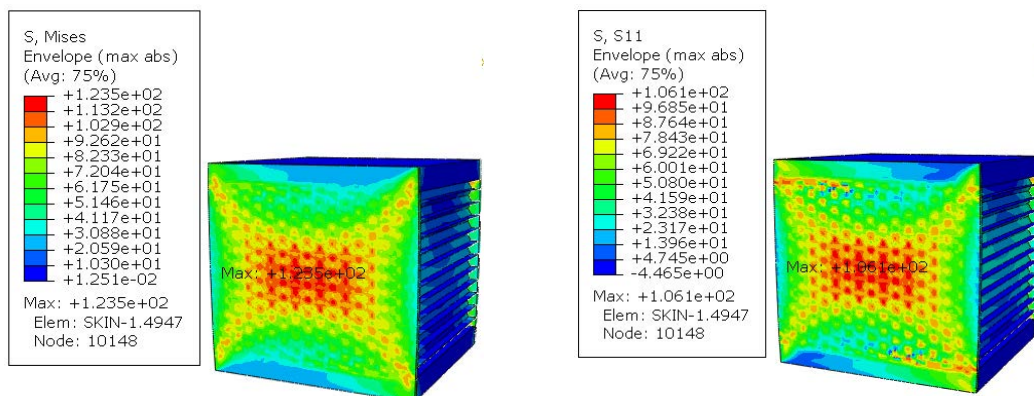


Рисунок 40 – Распределение максимальных напряжений для образцов 49 мм: а) по Мизесу, б) в направлении s11

Распределение максимальных напряжений для моделей с толщинами от 50-80 мм значительно отличается от распределения, полученного для предыдущего диапазона, рисунок 41. Основное отличие: максимальные напряжения сместились из центра панели к нагружаемым краям, что свидетельствует о совершенно ином характере возникающего напряженного состояния и приводит к изменению места разрушения.

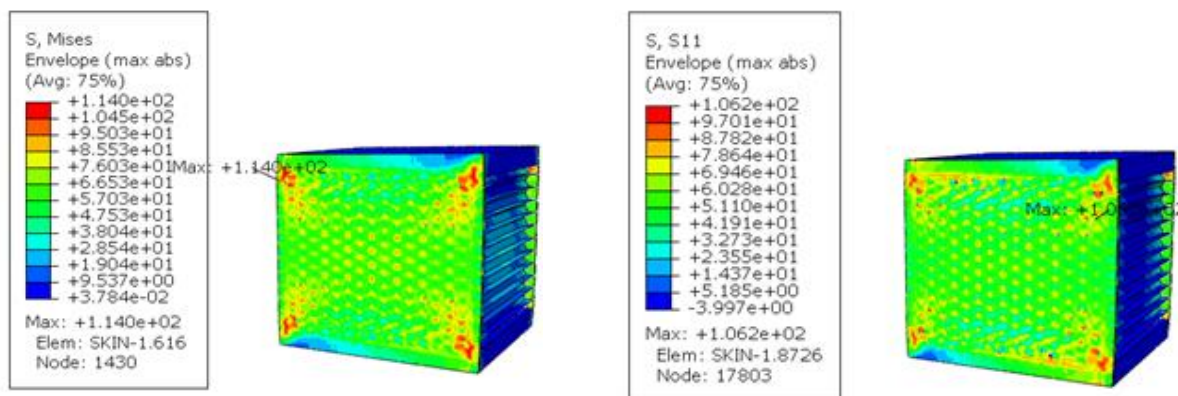


Рисунок 41 – Распределение максимальных напряжений для образцов с толщиной 50мм: а) по Мизесу, б) в направлении s11

Наиболее вероятно, данное перераспределение может быть связано с тем, что в моделях с толщиной от 3-49 мм увеличивается площадь нагружаемого торца, но значение пластических деформаций в сотовом заполнителе является еще недостаточным чтобы оказать влияние на общее распределение напряжений. В модели шириной 50 мм накопление пластических деформаций достигает некоего предела, после которого происходит перераспределение напряжений из центральной

части образца к нагружаемым торцам, рисунок 42. Для наглядной демонстрации изгиба, на рисунке 42б деформации приведены в масштабе 5:1.

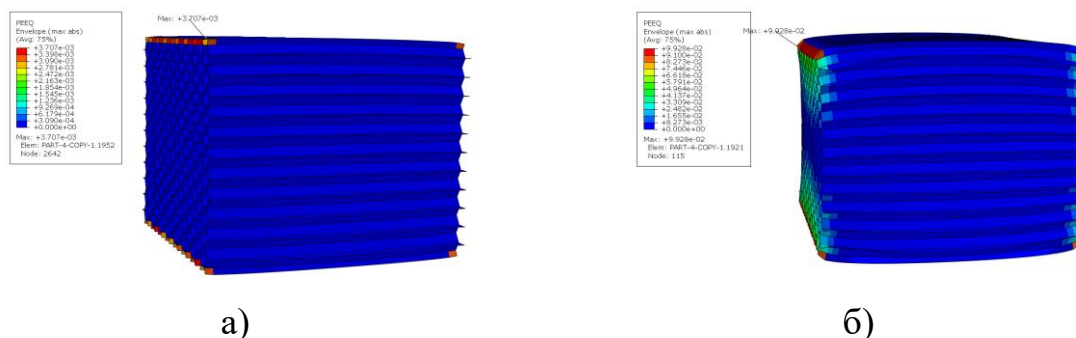


Рисунок 42 – Накопление пластических деформаций в сотовом заполнителе

В результате проведенных исследований выявлена следующая закономерность: зарождение разрушения образцов трехслойной панели из ПКМ происходит в местах контакта сотового заполнителя с углепластиковой обшивкой, после потери связи между ними обшивка теряет устойчивость и разрушается. В случае образцов с толщиной более 50мм происходит перераспределение напряжений в сотовом заполнителе (из-за накопления пластических деформаций в заполнителе) от центра на торцевые области (рисунок 42), подкрепленные упрочняющим клеевым компаундом. За счет дополнительного механического упрочнения в торцевых зонах разрушения связей между сотовым заполнителем и обшивкой здесь не происходит, что приводит к повышению несущей способности образца. Данный эффект предопределяет концентрацию напряжений возле нагружаемых торцов, что может говорить о возможном разрушении образца в области нагружаемых торцов.

Таким образом, данная методика упрочнения - 5 мм, может быть гарантировано использована для толщин трехслойных образцов до 49 мм, и должна быть дополнительно экспериментально проверена для образцов свыше 50 мм.

3.4 Технология упрочнения торцов

Образцы, вырезаемые из элементов конструкции ЛА, агрегатов и крупноразмерных конструктивно подобных образцов, являются наиболее показательными, так как учитывают все технологические особенности формования реальной конструкции из ПКМ, (практически не воспроизводимые при исследовании образцов из специально изготовленных технологических панелей).

Данные особенности могут существенно влиять на получаемые конечные значения упругих и прочностных характеристик, а также на их разбросы [35].

При проведении настоящих исследований для получения представительных образцов были вырезаны фрагменты из панелей механизации крыла гражданского самолета, изготовленных в заводских условиях серийного производства с учетом всех технологических особенностей формования серийных деталей. Из панелей ручным инструментом вырезались фрагменты размером около 400х400 мм для дальнейшей обработки на специализированном фрезерном станке с числовым программным управлением (ЧПУ). Образцы для испытаний подготавливались в следующей последовательности:

- 1- вырезались полосы размером 400х50 мм с обеспечением параллельности и плоскостности боковых граней в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56809-2015;
- 2- полученные полосы разделялись на образцы размером 50х52мм, (дополнительный припуск +1мм на каждую сторону - оставлен для последующей обработки торцов, после нанесения упрочняющего компаунда);
- 3- удалялся сотовый наполнитель на глубину, рассчитанную в разделе 3.2 настоящей работы;
- 4- заполнение полости с торцевой стороны специальным клеем конструкционного назначения ВК-27, его отверждение;
- 5- обработка торцов упрочненных граней образцов с обеспечением параллельности и плоскостности их в соответствии с требованиями ГОСТ Р 56809-2015.

Схематичное изображение подготавливаемых образцов представлено на рисунке 43.

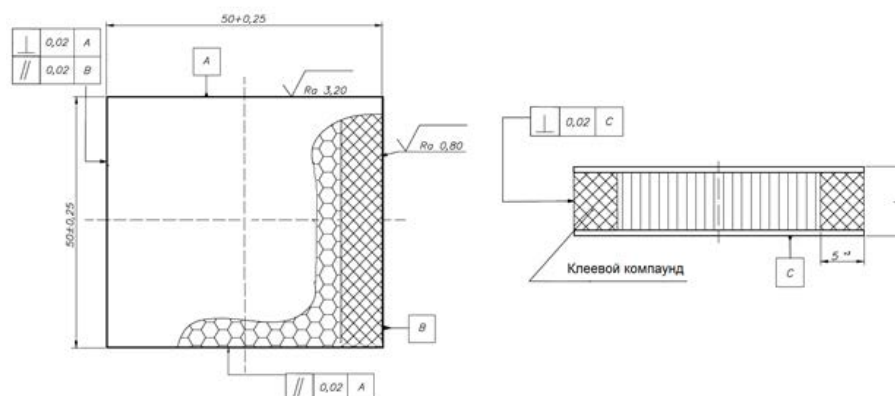


Рисунок 43 – Схематичное изображение подготавливаемых образцов

На рисунке 44 представлена иллюстрация образца, подготовленного для проведения испытаний на торцевое сжатие (вид на упрочненный торец).



Рисунок 44 – Фотография образца с упрочненными торцевыми гранями для проведения испытаний на торцевое сжатие

Одним из важных требований к методологии подготовки образцов для проведения испытаний является снижение трудоемкости, вследствие необходимости обеспечения испытаний их в большом количестве – несколько сотен экземпляров. Пример серии образцов в количестве ~300 экземпляров, подготовленных к прочностным испытаниям, представлен на рисунке 45. На фотоснимке образцы с одинаковыми толщинами собраны в кассеты по 5-15 штук.

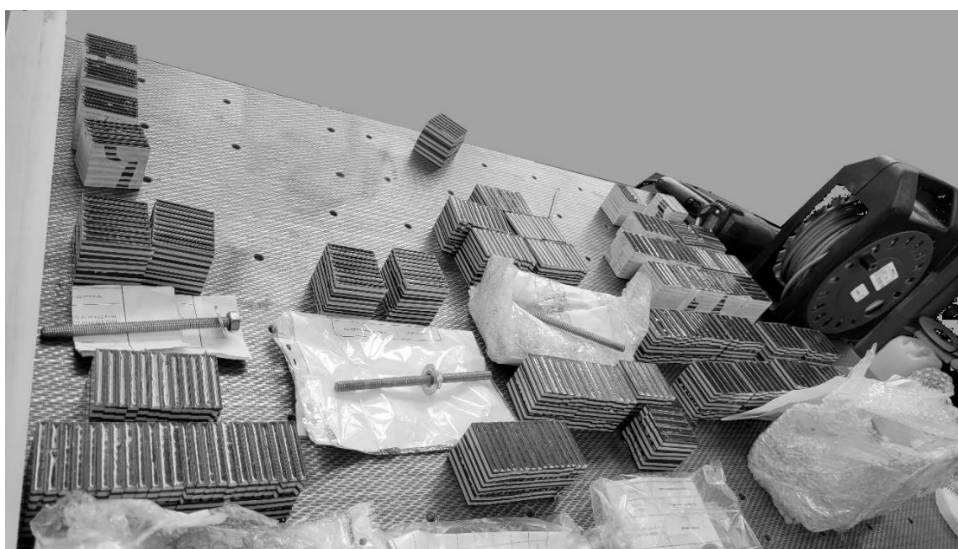


Рисунок 45 – Фотография одной серии образцов, подготавливаемых к проведению прочностных испытаний при торцевом сжатии

Данная методика проверена в ходе специальных квалификационных испытаний материалов с различными заполнителями трехслойных панелей, детальное описание которых представлено в главе 4.

Выводы к главе 3

Всесторонне рассмотрен, изучен и проанализирован подход к решению проблемы незачетного разрушения трехслойных панелей в процессе испытаний на торцевое сжатие путем упрочнения нагружаемых торцов образца. Достоверно установлено, что при торцевом сжатии образцов с определенными типами заполнителей без дополнительного укрепления нагружаемых торцов происходит потеря устойчивости и разрушение образца вне зачетной зоны.

Проведено расчетно-экспериментальное исследование с целью определения оптимальной глубины укрепления нагружаемых торцов образца и возможных границ применения в зависимости от толщин трехслойной панели, в ходе которого установлено:

- даже минимальное укрепление нагружаемых торцов приводит к перераспределению максимальных напряжений в центр образца;

- варьирование глубины укрепления показало, что наилучший вариант укрепления является 5мм, данный вариант укрепления не оказывает существенного влияния на жесткость образца, а также не завышает разрушающую нагрузку;

- разработанная методика упрочнения может быть гарантировано использована при испытании трехслойных образцов с толщинами до 49 мм, в панелях с большими толщинами происходит перераспределение напряжений в заполнителе, и в случае металлического сотового заполнителя - накопление пластических деформаций. Для применения на образцах с толщинами свыше 50 мм разработанная методика должна быть дополнительно экспериментально проверена.

4 Отработка разработанных методик испытаний

Значения прочностных характеристик и усталостной долговечности композиционных материалов зависят не только от внешних факторов, но и от вариации параметров производства и изменения свойств исходного сырья от партии к партии. Это приводит к неизбежному разбросу характеристик материала и деталей, изготовленных из него деталей, что необходимо учитывать при проектировании элементов конструкции ЛА.

Используемые при расчетах значения характеристик ПКМ, определяемые по результатам испытаний должны быть статистически обоснованными. В соответствии с требованиями НЛГ-23, 25 (п.613) расчетные значения прочностных характеристик материала должны обеспечить заданный показатель его прочности с вероятностью не ниже 90% и с уровнем доверия 95%. Такой уровень надежности ПКМ должен быть обеспечен на протяжении всего периода эксплуатации изделия при условии стабильности производства и свойств ПКМ.

При проведении отработки разработанных методик испытаний за основу были приняты принципы анализа экспериментальных данных для слоистых пластиков с адаптацией их применения для трехслойных материалов. В разделе 4.1 представлены результаты отработки разработанных методик на примере трехслойных панелей с заполнителем из арамидной бумаги. В разделе 4.2 представлены исследования по влиянию климатических факторов на прочность трехслойных материалов. В разделе 4.3 представлены экспериментальные данные для перспективных заполнителей, а также исследуется влагопоглощение таких заполнителей, результаты сравниваются с классическими типами заполнителей.

4.1 Испытания ПКМ трехслойных панелей с сотовым заполнителем из арамидной бумаги

Отработка методики испытаний проводилась на трехслойных образцах, вырезанных из панелей обшивки рулей направления и корневого закрылка среднемагистрально пассажирского самолета. В рамках работы проведены четыре вида испытаний, описание которых представлено далее.

4.1.1 Испытания на сдвиг

Испытания проводились в соответствии с рекомендациями положений разработанного стандарта СТО СМК 7-158-2023. В ходе испытаний определяется прочность при сдвиге параллельно плоскости трехслойного образца и модуль сдвига, связанного с деформациями в плоскости перпендикулярной плоскости обшивки.

Для получения экспериментальных данных использовались плоские образцы 50x160 мм, с номинальной толщиной: 6.2 мм, 9.2 мм и 12 мм. Общее количество образцов - 54 шт. Эскиз образца представлен на рисунке 46.

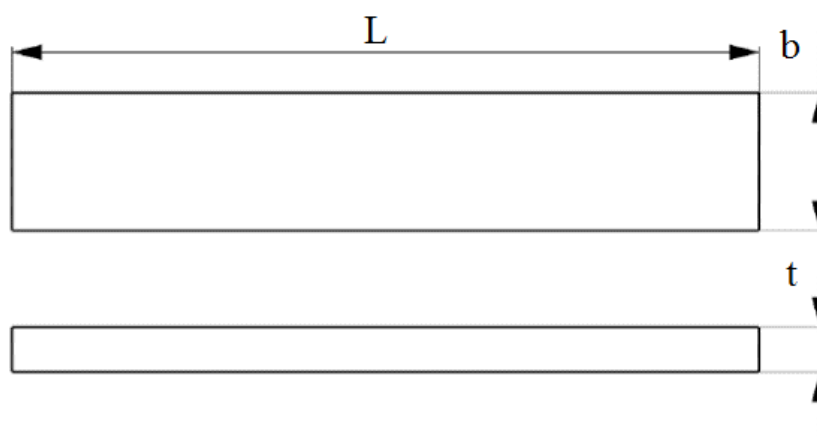


Рисунок 46 – Образец для испытания на сдвиг ($L=160$ мм, $b=50$ мм, $t=6.2, 9.2, 12$ мм.)

Значение скорости нагружения равное $V=0.25$ мм/мин получено эмпирическим путем, исходя из условия достижения разрушения образца в промежутке времени от 1 до 10 минут. Для испытания использовалась стандартная, предусмотренная методикой испытаний, типовая оснастка. При установке образцов в испытательной машине неукоснительно соблюдалось обязательное условие: линия нагружения должна проходить через противоположные углы трехслойного образца, рисунок 47.



Рисунок 47 – Образец в испытательной машине

Обобщенные результаты, полученные в ходе испытаний трехслойных панелей с разными толщинами, обладают удовлетворительной сходимостью и небольшим коэффициентом вариации – менее 8.4%, таблица 4.

Таблица 4- Обобщенные результаты испытаний на сдвиг трехслойных панелей с разными толщинами

	Номинальная толщина панели, мм	Средняя разрушающая нагрузка, кгс	Средняя τ_{11} , кгс/мм ²	Средний модуль упругости, кгс/мм ²
	6.2	1311	0.16	3.04
Коэффициент вариации, %		5.8	5.8	7.3
	9.2	1091	0.14	3.42
Коэффициент вариации, %		2.09	1.96	8.33
	12	1571	0.20	4.10
Коэффициент вариации, %		5.05	5.06	3.75

В соответствии с требованиями Технических условий (ТУ) [34] испытанный материал полностью обладает заявленными прочностными характеристиками.

4.1.2 Испытания на торцевое сжатие

Испытания проводились в соответствии с рекомендациями положений разработанного стандарта СТО СМК 7-160-2023. В ходе испытаний определяются значения предела прочности на сжатие параллельно внешним обшивкам образца.

Для получения экспериментальных данных использовались образцы размером 50x50 мм, с номинальной толщиной: 6.2 мм, 9.2 мм и 12 мм. Общее количество образцов - 54шт. Эскиз образца представлен на рисунке 48.

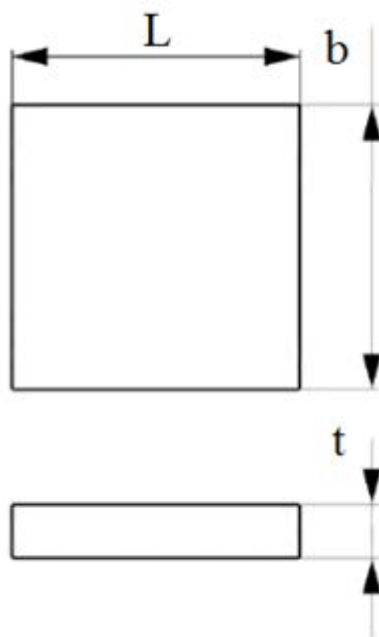


Рисунок 48 – Образец для испытания на торцевое сжатие ($L=50$ мм, $b=50$ мм, $t=6.2, 9.2, 12$ мм.)

Значение скорости нагружения равное $V=0.15$ мм/мин получено эмпирическим путем, исходя из условия достижения разрушения в промежутке времени от 1 до 10 минут. Для испытания использовалась стандартная, предусмотренная методикой испытаний, типовая оснастка, рисунок 49.



Рисунок 49 – Образец в испытательной машине

Обобщенные результаты, полученные в ходе испытаний трехслойных панелей, обладают приемлемой сходимостью с коэффициентом вариации по разрушающей нагрузке в пределах 14%, таблица 5.

Таблица 5- Результаты испытаний на торцевое сжатие трехслойных панелей с разными толщинами

	Номинальная толщина панели, мм	Средняя разрушающая нагрузка, кгс	Средняя σ , кгс/мм ²
	6.2	1094	2.56
Коэффициент вариации, %		12.56	20.66
	9.2	1524	2.16
Коэффициент вариации, %		11.42	11.06
	12	2140	2.36
Коэффициент вариации, %		13.18	12.11

4.1.3 Испытания на сжатие

Испытания проводились в соответствии с рекомендациями положений разработанного стандарта СТО СМК 7-159-2023. В ходе испытаний определяется значения предела прочности при сжатии в направлении перпендикулярном внешним обшивкам.

Для получения экспериментальных данных использовались образцы размером 50x50 мм, с номинальной толщиной: 6.2 мм, 9.2 мм и 12 мм. Общим количеством 54 шт. Эскиз образца представлен на рисунке 50.

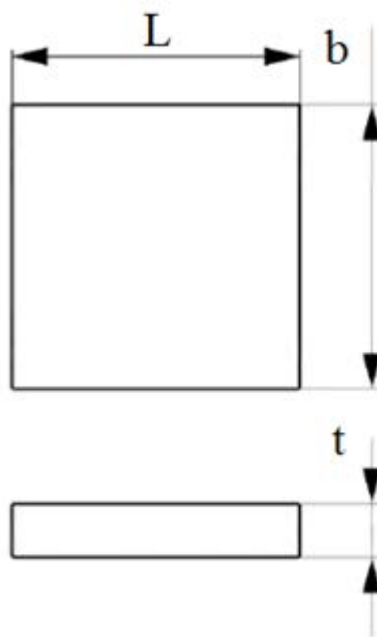


Рисунок 50 – Образец для испытания на торцевое сжатие ($L=50$ мм, $b=50$ мм, $t=6.2, 9.2, 12$ мм.)

Значение скорости нагружения равное $V=0.25$ мм/мин получено эмпирическим путем, исходя из условия достижения разрушения в промежутке времени от 1 до 10 минут. Для испытания использовалась стандартная, предусмотренная методикой испытаний, типовая оснастка, рисунок 51.



Рисунок 51 – Образец в испытательной машине

Обобщенные результаты, полученные в ходе испытаний трехслойных панелей с разными толщинами на сжатие, обладают приемлемой сходимостью с коэффициентом вариации в пределах 14%, таблица 6.

Таблица 6 - Результаты испытаний на сжатие трехслойных панелей с разными толщинами

	Номинальная толщина панели, мм	Средняя разрушающая нагрузка, кгс	Средняя σ , кгс/мм ²	Средний модуль упругости, кгс/мм ²
	6.2	3091	1.24	15.26
Коэффициент вариации, %	7	7.04	28.85	
	9.2	3186	1.27	23.77
Коэффициент вариации, %	2.95	3.00	13.70	
	12	712	0.28	15.08
Коэффициент вариации, %	13.6	13.63	19.07	

Сравнительно увеличенный разброс значений по показателю модуля упругости, по мнению автора, является следствием следующих обстоятельств, а именно:

- повышенная погрешность регистрации перемещений при использовании датчика деформации (экстензометра);
- наличие производственных дефектов трехслойных панелей в местах соединения обшивки и заполнителя (нестабильное количество связующего в зоне стыка обшивки и заполнителя). Примеры таких производственных дефектов приведены на рисунке 52.

В работах [83-85] авторы, подробно исследуя место соединения обшивок и заполнителя, пришли к основным выводам о том, что данное место является сильно зависимым от технологии производства, параметров формовки, наличия дефектов (пор) и применяемых клеевых композиций. Дополнительно этими исследователями установлено, что образцы с высокой плотностью заполнителя, демонстрируют на 5% выше показатели прочности при испытании на сжатие, из-за увеличения площади клеевого шва.

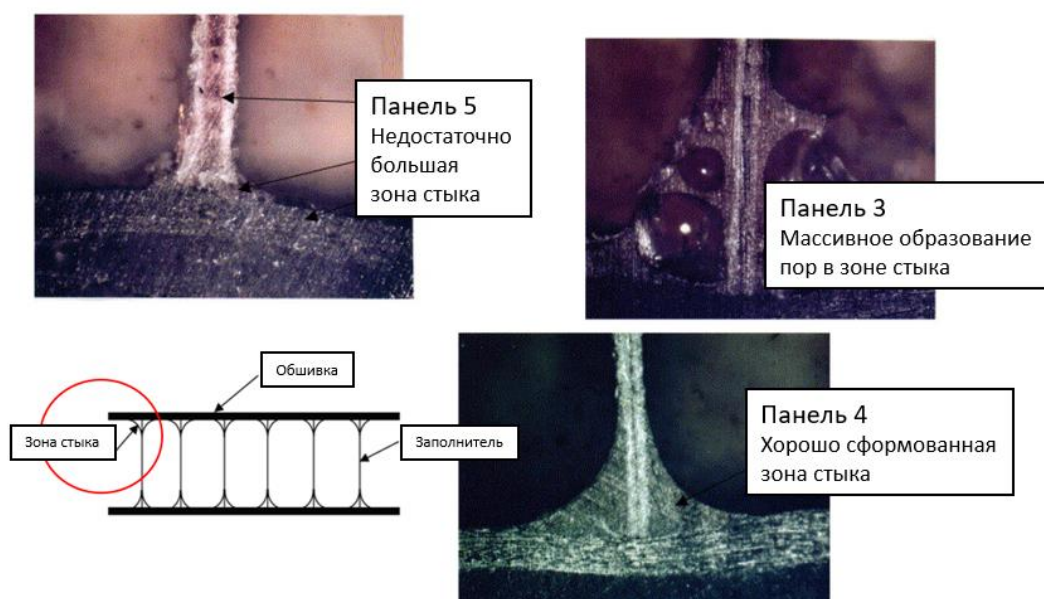


Рисунок 52 – Места соединения сотового заполнителя и обшивки в трехслойных панелях [84]

4.1.4 Испытания на растяжение

Испытания проводились в соответствии с рекомендациями положений разработанного стандарта СТО СМК 7-157-2023. В ходе испытаний определяется предел прочности при растяжении перпендикулярном внешним обшивкам.

Для получения экспериментальных данных использовались образцы размером 100x100 мм, с номинальной толщиной: 6.2 мм, 9.2 мм и 12 мм. Общим количеством - 54 шт. Эскиз образца представлен на рисунке 53.

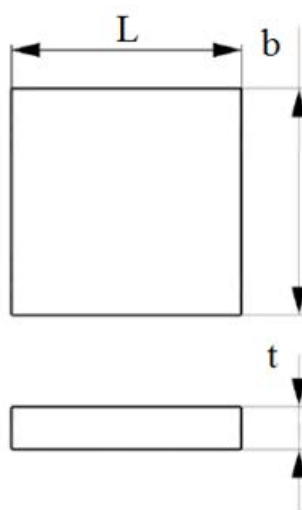


Рисунок 53 – Образец для испытания на растяжение ($L=100$ мм, $b=100$ мм, $t=6.2, 9.2, 12$ мм.)

Скорость нагружения: $V=0.25$ мм/мин. Для испытания образца использовалась стандартная, предусмотренная методикой испытаний, типовая оснастка, рисунок 54.

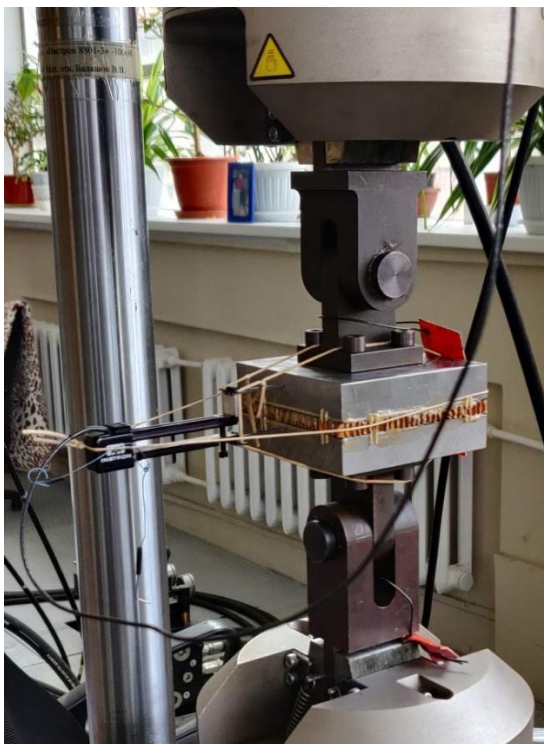


Рисунок 54 – Образец в испытательной машине

Обобщенные результаты, полученные в ходе испытаний трехслойных панелей с разными толщинами на растяжение, обладают приемлемой сходимостью с коэффициентом вариации по разрушающей нагрузке и напряжениями – менее 7%, а по модулю упругости – менее 12.5%, таблица 7.

Таблица 7 Результаты испытаний на растяжение с разными толщинами

	Номинальная толщина панели	Средняя разрушающая нагрузка, кгс	Средняя σ , кгс/мм ²	Средний модуль упругости, кгс/мм ²
	6.2	4130	0.41	36.27
Коэффициент вариации, %		2.62	2.56	12.43
	9.2	4223	0.42	27.07
Коэффициент вариации, %		4.87	5.53	9.42
	12	4559	0.46	43.43
Коэффициент вариации, %		6.47	6.57	4.79

Проведена отработка применения выпущенных методик ФАУ «ЦАГИ» СТО на примере трехслойных панелей с сотовым заполнителем из арамидной бумаги. Полученные результаты можно охарактеризовать как приемлемыми, так как

полностью соответствуют пределам, обозначенным в ТУ на материал, коэффициенты вариации экспериментальных данных для значительной части полученных результатов не превышают 10%.

Как отмечалось ранее в выводах второй главы, общепромышленные стандарты испытаний в силу присущих им методических недостатков могут характеризоваться значительным разбросом экспериментальных данных, величина которого может достигать 45%.

На рисунке 55 представлены данные, полученные в ходе экспериментальных работ [105-107]. Для обеспечения наглядного сравнения на диаграмму нанесены результаты как из литературных источников (синие, зеленые, красные маркеры), так и полученные в рамках выполнения этой работы (белые маркеры), соответствующие различным типам нагружения, а также коэффициенты вариации по определяемым характеристикам прочности (τ) и жесткости (G).

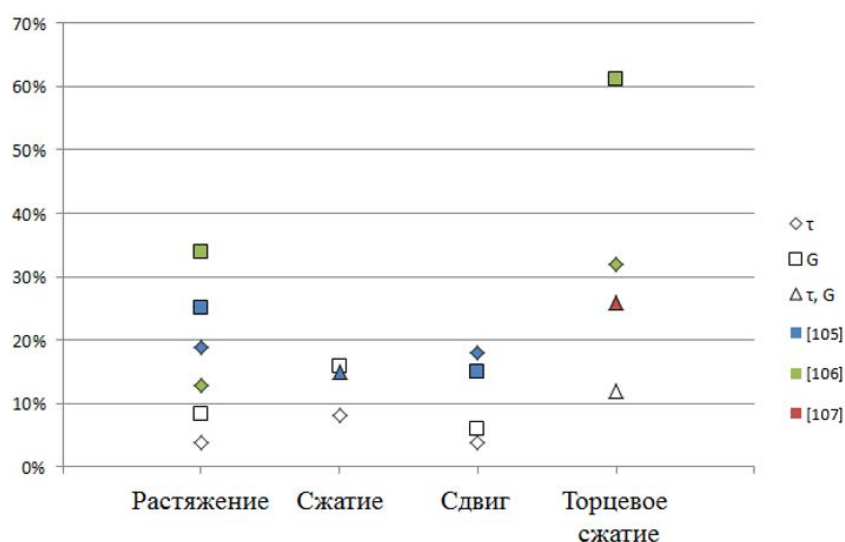


Рисунок 55 – Данные полученные в экспериментальных работах

Как можно заметить практически все экспериментальные результаты из литературных источников находится за пределами 13% по коэффициенту вариации. При этом для практически всех типов нагружения определение модуля упругости сопровождается большим разбросом данных. Аналогичная тенденция наблюдается и в результатах, полученных в настоящем исследовании. В целях повышения точности и достоверности будущих экспериментальных исследований целесообразно внедрение современных методов измерения деформаций, таких как

видеоэкстензометры или методы цифровых корреляций изображений. Указанные технологии позволяют осуществлять бесконтактную регистрацию полей перемещений и деформаций по всей поверхности образца на протяжении всего процесса нагружения, что способствует минимизации погрешности измерения и, как следствие, снижает разброс экспериментальных данных.

Таким образом, разработанные рекомендации и предложенные методы, которые легли в основу стандартов СТО СМК, были успешно апробированы и подтвердили свою эффективность на практике.

В результате внедрения удалось снизить коэффициент вариации в 4.5 раза. Подобное уменьшение разброса экспериментальных данных напрямую повышает достоверность определяемых характеристик материалов, что, в свою очередь, позволяет применять более точные и оптимизированные коэффициенты надежности для конструкции ЛА.

4.2 Испытания ПКМ трехслойных панелей с алюминиевым сотовым наполнителем на торцевое сжатие с учетом климатических факторов

4.2.1 Влияние климатических факторов на прочность

Как показывают многочисленные исследования различных авторов [37-41] атмосферные условия (температура и влажность окружающей среды) оказывают значительное влияние на прочностные свойства ПКМ. Эти факторы выступают в роли активаторов старения материала, инициируют развитие физико-химических изменений, в результате чего деформационно-прочностные показатели материалов могут существенно снижаться (вплоть до 30%), что в свою очередь приводит к уменьшению усталостной долговечности.

Требования по надежности авиационной техники и обеспечению долговечности конструкции на этапе проектирования изделий закреплены в НЛГ (части 23, 25; п.п. 613, 571, 572, 573). Согласно положений этих пунктов, одним из ключевых критериев при выборе материалов на стадии разработки эскизного проекта изделия является их стойкость к воздействию климатических факторов.

При оценке влияния климатических факторов на разрушение ПКМ в климатической камере устанавливаются следующие параметры экспозиции:

относительная влажность, температура и время, обеспечивающие баланс влаги в образцах. Для определения усталостной прочности изделий учитывается равновесное среднее значение влаги за срок службы, для статической прочности – максимальное. Введение редуционных коэффициентов по параметрам атмосферных условий (КВ, КТ, КВТ) позволяет учитывать снижение расчетных характеристик прочности в измененных условиях влажности и температуры. Для определения редуционных коэффициентов необходимо проведение специальных испытаний не менее девяти образцов в заданных условиях температуры и влажности. Результаты таких испытаний сравниваются со средними значениями характеристик при нормальных условиях. На основании МОС к НЛГ 23, 25(п.613 и п.571) при отсутствии данных по испытаниям, допускается использование коэффициента $KBT = 1.25$.

Далее по тексту представлены описание объекта и результаты испытаний на торцевое сжатие с учетом климатических факторов (разделы 4.2.2 и 4.2.3).

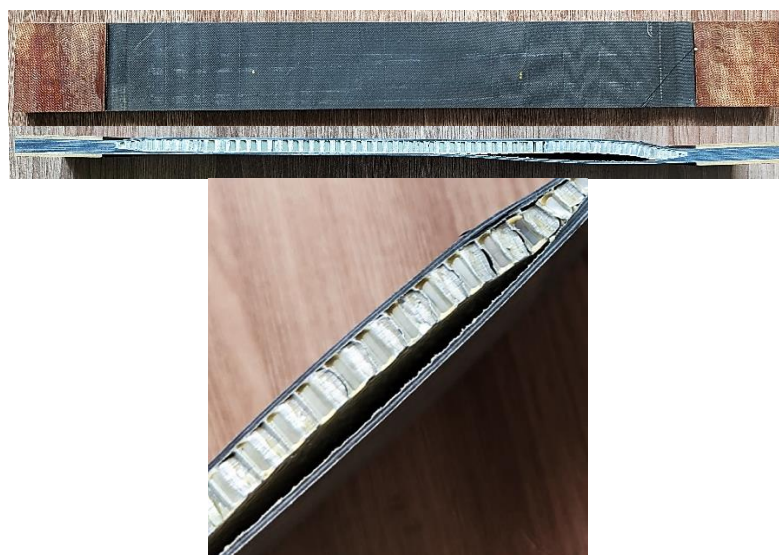
4.2.2 Объект испытания

Объектом испытаний на торцевое сжатие с учетом климатических факторов явилась ряд образцов, вырезанных из конструкционных трехслойных панелей с характерными дефектами.

Рисунок 56 –
Общий вид панели
(а), с дефектом
крупным планом
(б)

а)

б)



Образцы были подготовлены в соответствии с пунктами (разделов 3.2 и 3.4 настоящей работы), имеют геометрию в соответствии с рекомендациями стандарта СТО СМК 7-160-2023. Размер 50x50 мм, общая толщина образца - 8.04 мм, толщина

сотового заполнителя - 6.04 мм. Обшивки образца выполнены из ПКМ, армированного углеволокнами. В качестве заполнителя используется сотовый заполнитель, изготовленный из алюминиевого сплава марки Д16Т.

Общий вид образцов представлен на рисунке 57.

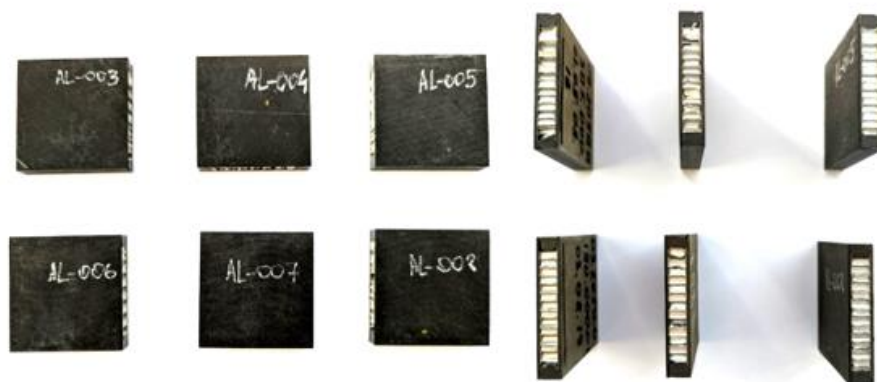


Рисунок 57 – Образцы для испытаний на торцевое сжатие с укрепленными торцами

Из 6 конструкционных панелей ЛА было получено 20 образцов, которые были поделены на 3 части: первая часть образцы для испытаний при лабораторной температуре в состоянии поставки (RTD), вторая часть - образцы для испытаний при лабораторной температуре влагонасыщенные (RTW), третья часть - образцы для влагонасыщенные для испытаний при повышенной температуре (ETW).

Испытания проводились на электромеханической испытательной машине типа Instron 5958 с использованием накатной камеры марки Instron CP110128. Влагонасыщение образцов RTW и ETW проводилось в климатической камере ACS Discovery DY -1 при следующих значениях параметров экспозиции: температура - 82°C, влажность - 85%.

Влагонасыщение образца контролировалось путем фиксирования изменения его массы, через фиксированные отрезки времени. На рисунке 58 представлена полученная диаграмма зависимости изменения массы (в процентах) от количества суток нахождения в климатической камере, для усреднённых результатов. В таблице 8 представлено изменение массы в процентах для каждого из образцов.

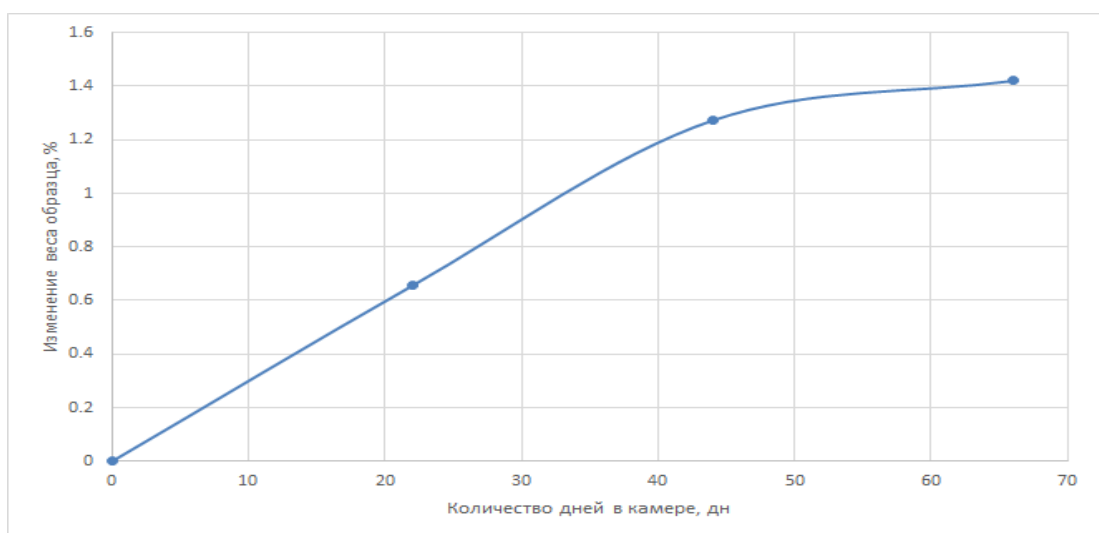


Рисунок 58 – Диаграмма зависимости относительного изменения массы образца от количества суток в камере.

Таблица 8 Результаты изменения массы образца в климатической камере

Номер образца	Количество суток в климатической камере			
	0	22	44	66
AL-009	0	0.712	1.306	1.506
AL-010	0	0.611	1.247	1.404
AL-011	0	0.634	1.265	1.374
AL-012	0	0.622	1.247	1.429
AL-013	0	0.637	1.266	1.373
AL-014	0	0.633	1.304	1.432
AL-015	0	0.932	1.288	1.424
AL-016	0	0.472	1.257	1.453
AL-017	0	0.663	1.246	1.344
AL-018	0	0.612	1.266	1.412
AL-019	0	0.671	1.294	1.466
AL-020	0	0.668	1.294	1.435

Испытания проводились в соответствии с рекомендациями стандарта СТО СМК 7-160-2023. Нагружение образцов производилось с использованием специальной оснастки, рисунок 59.

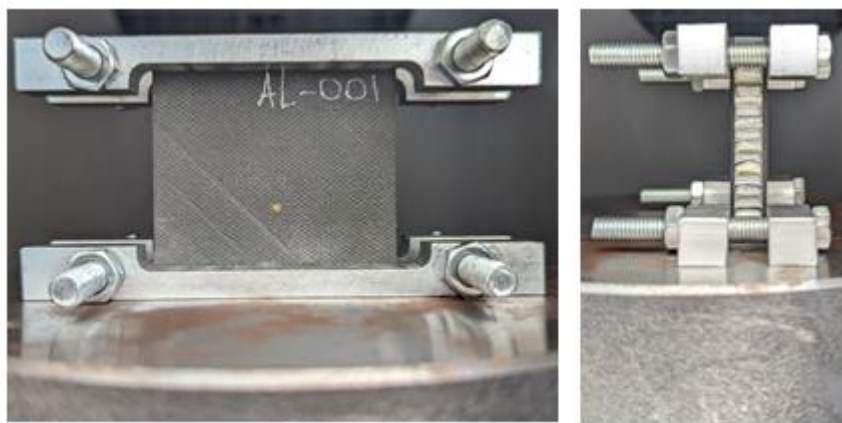


Рисунок 59 – Образец с оснасткой в испытательной машине

На рисунках 60-61 представлены основные моды разрушения образцов полученные в ходе испытаний.



Рисунок 60 – Мода разрушения образца (FBF) - потеря устойчивости обшивки



Рисунок 61 – Мода разрушения образца (FCF) - разрушение обшивки от

4.2.3 Результаты испытаний

По результатам проведенных испытаний были получены диаграммы зависимости «нагрузка-перемещение» образцов при разных климатических факторах, рисунок 62-64.

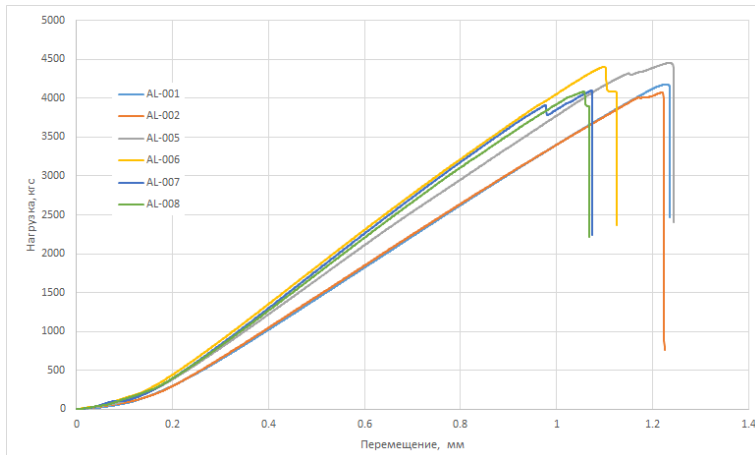


Рисунок 62 – Диаграмма зависимости «нагрузка-перемещение» для образцов RTD

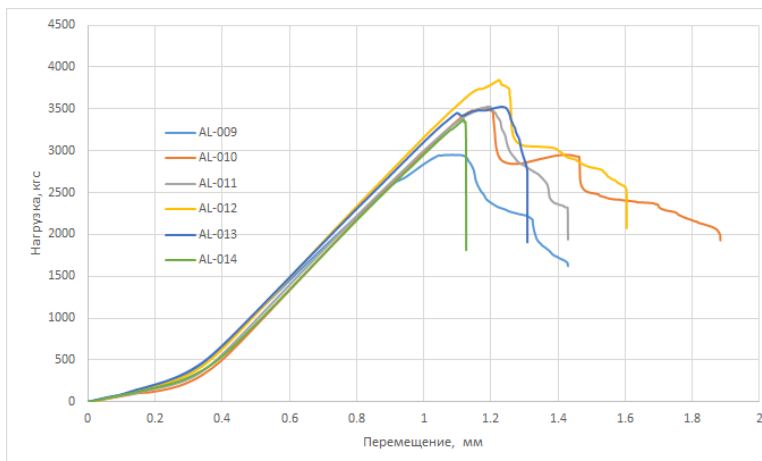


Рисунок 63 – Диаграмма зависимости «нагрузка-перемещение» для образцов RTW

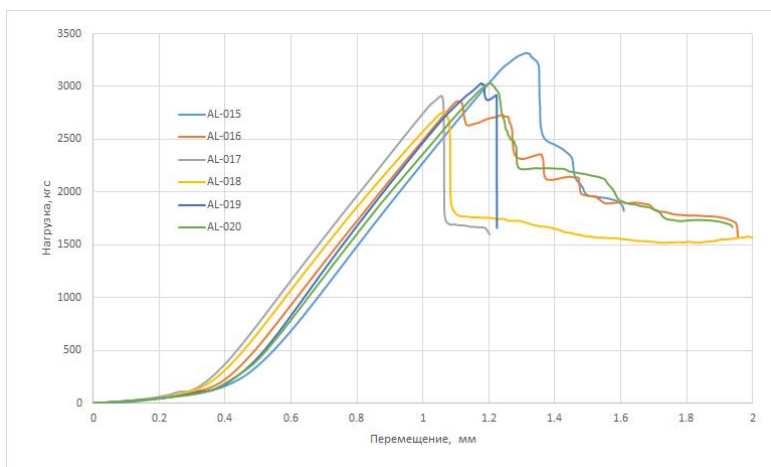


Рисунок 64 – Диаграмма зависимости «нагрузка-перемещение» для образцов ETW

Основные экспериментальные данные для вышеуказанных образцов, испытанных при разных климатических состояниях сведены в таблицу 9.

Таблица 7 Результаты эксперимента

	RTD			RTW			ETW		
	P_{max} , кгс	σ_c , кгс/мм ²		P_{max} , кгс	σ_c , кгс/мм ²		P_{max} , кгс	σ_c , кгс/мм ²	
	4179	36.24	FCF	2952	23.41	FBF	3319	27.02	FBF
	4073	32.47	FBF	3510	27.82	FBF	2862	22.6	FBF
	3675	31.23	FCF	3528	28.88	FCF	2911	22.3	CSF
	4401	36.17	FCF	3846	31.61	FBF	2755	22.74	FCF
	4456	34.19	FBF	3525	29.59	FBF	3033	25.98	FBF
	4400	35.74	FBF	3374	29.05	FCF	3034	23.49	FBF
	4105	30.94	FCF						
	4082	31.25	FCF						
ср.зн.	4171	33.62		3456	28.39		2986	24.02	
к.в.,%	6.1	7.1		8.4	9.7		6.5	8.3	

Рассмотрев полученные данные можно сделать вывод что методика испытаний позволяет получать расчетные значения с достаточно маленьким разбросом, коэффициент вариации для образцов с разными режимами испытаний находится в пределах 8.4% по разрушающей нагрузке и 9.7% по напряжениям. Большинство образцов из трехслойных панелей с алюминиевым сотовым наполнителем показывает 2 основные моды разрушения: потеря устойчивости обшивок (FBF) и разрушение обшивки от сжатия (FCF). Равновесное состояние по влагонасыщению трехслойных панелей с алюминиевым сотовым наполнителем находится в пределах 1.5% от массы образца, который достигается в пределах 70 дней.

Оценивая разрушающую нагрузку для образцов в состоянии поставки при лабораторной температуре (RTD), можно отметить что среднее значение, полученное в эксперименте равно 4171 кгс или 33.62 кгс/мм² по напряжениям, влагонасыщение и дальнейшее испытание при лабораторной температуре (RTW) снижает разрушающую нагрузку на 17% до значения 3456 кгс или 28.39 кгс/мм². При испытании влагонасыщенных образцов при повышенной температуре (ETW) разрушающая нагрузка снижается на 30% относительно случая RTD и составляет 2986 кгс. В работе рассматривается [31] климатическое влияние влагонасыщения при различных температурах при испытании трехслойных материалов при растяжении, авторы отмечают аналогичную тенденцию снижения разрушающей

нагрузки, ~20-25% при лабораторной температуре, и порядка 40-50% при испытании при 104⁰С, рисунок 65.

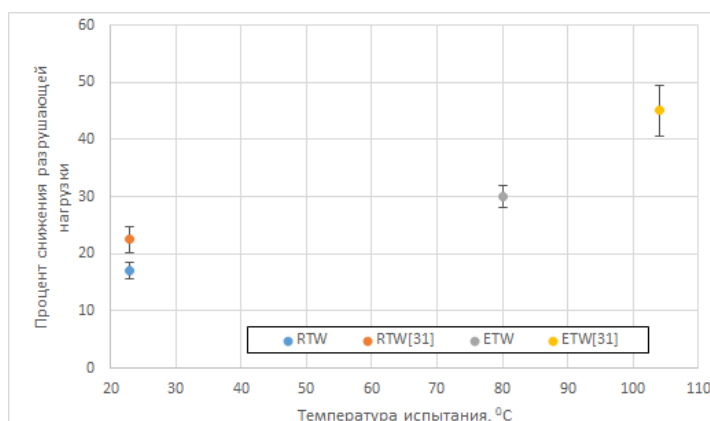


Рисунок 65 – Сравнение полученных экспериментальных данных и данных литературы [31]

4.3 Испытания ПКМ трехслойных панелей с перспективными заполнителями

В процессе эксплуатации трехслойные материалы подвергаются различным климатическим воздействиям. Как было описано в разделе 4.2 это влияние может оказать значительное воздействие на прочностные характеристики, так как долговечность этих конструкций определяется целостностью адгезивного соединения обшивки-заполнитель, а также от прочностных свойств самого заполнителя. В процессе эксплуатации влага может проникать в структуру трехслойного заполнителя через поврежденные обшивки, а также поврежденные уплотнения или стыки тем самым аккумулироваться в ячейках сотового заполнителя. Помимо этого, влага на протяжении длительного времени способна диффундировать в эпоксидную матрицу, напитывая при этом обшивки без наполнения заполнителя в явном виде. В работе [86] продемонстрирована визуализация высокого разрешения воды внутри ячеек сотового заполнителя рисунок 66. И сделан вывод что метод магнитного резонанса хорошо подходит для трехслойных панелей с сотовыми заполнителями из арамидной бумаги и алюминия с оболочками из углепластика.

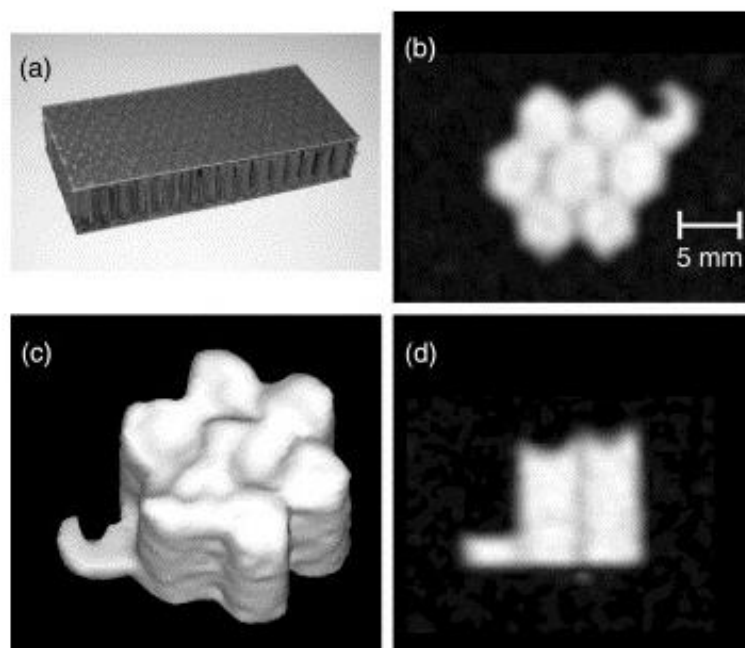


Рисунок 66 – Накопление воды в трехслойных материалах (a) –образец, (b) и (d) поперечное и осевое сечение ячейки, (c) – трехмерный рендер ячейки сотового заполнителя.

В работе [87] описываются результаты термографической инспекции 35% парка самолетов Boeing 767 авиакомпании United Airlines, обнаружено что в среднем в трехслойных конструкциях содержится около 50 кг воды, рисунок 67.

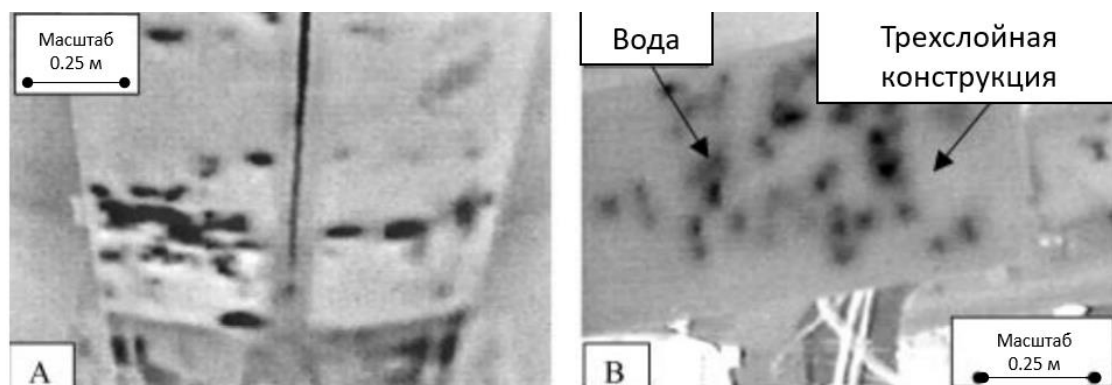


Рисунок 67 – Створка шасси 767 (a) передняя и (b) задняя

Таким образом важным направлением является поиск и применение материалов которые позволят повысить действующие напряжения и стабильны при климатическом воздействии. Первый вариант является заполнители на основе углепластиковых сот, которые имеют высокое соотношение прочности к весу, структура соты обеспечивает высокую жесткость, помимо этого углепластик не подвержен коррозии.

Второй вариант дисперсные заполнители по типу полимерных микросфер, обладает низкой плотностью и меньшим влагопоглощением по сравнению с сотовыми заполнителями из традиционных материалов.

4.3.1 Объект испытания

Образцы изготовлены из ПКМ системы «Аристар-Е и -ЕТН», в основе которой используется органическая матрица разработки ООО «НИИКАМ» заполнителем является углеродные волокна. В качестве заполнителя трехслойных панелей используется два типа: сотовый заполнитель Аристар-Е (углепластиковые соты) и «Аристид-Т (0.1)» дисперсный заполнитель на основе легковесных сферопластиков с плотностью 0.1 г/см^3 , рисунок 68.

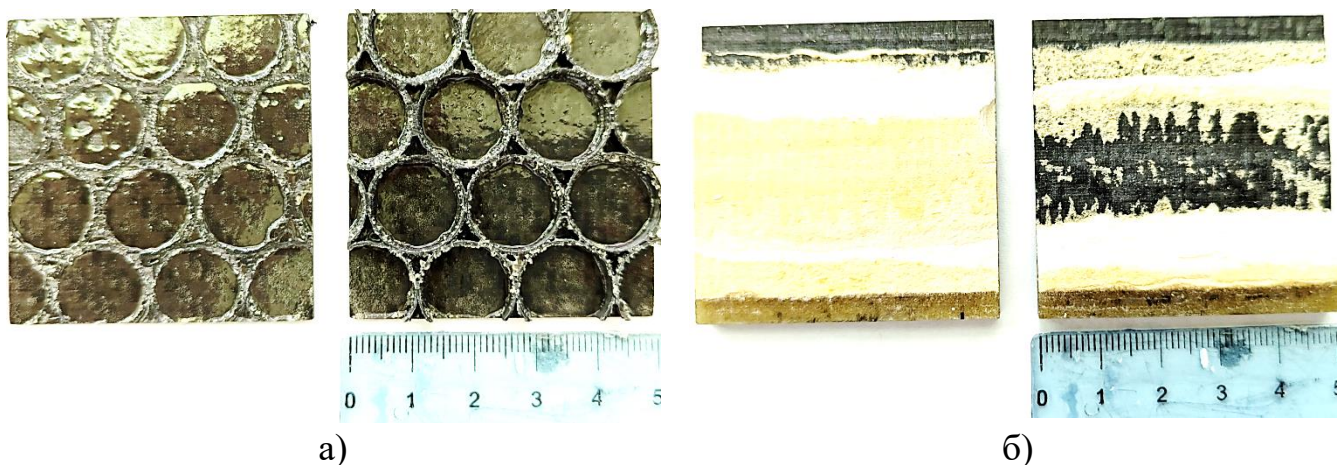


Рисунок 68 – Перспективные заполнители для трехслойных конструкций, а) углепластиковые соты, б) дисперсный заполнитель на основе легковесных сферопластиков

4.3.2 Результаты испытаний и обсуждение

В рамках работ проведены испытания на сжатие и торцевое сжатие трехслойных панелей с заполнителями Аристар-Е и Аристид-Т, рисунок 69, таблица 10.



Рисунок 69 – Образцы в испытательной оснастке в процессе нагружения

Таблица 10 Результаты на сжатие для толщины 6.2мм

Заполнитель	P_{max} , кгс	σ_c , кгс/мм ²	E, кгс/мм ²
Аристид- Т	594.5	0.2	9.1
Коэффициент вариации, %	11.1	11.1	14.2
Аристар- Е	4743.9	1.9	2668
Коэффициент вариации, %	6.3	6.3	16.2

Результаты сжатия панели показали, что заполнитель типа Аристид-Т (дисперсный заполнитель на основе легковесных сферопластиков) показывает примерно схожие свойства по модулю упругости и пределу прочности по сравнению с традиционным сотовым заполнителем из арамидной бумаги при этом результаты, полученные в ходе испытаний, характеризуются меньшими разбросами ~14% по сравнению с ~30% для панелей с заполнителем из арамидной бумагой, данные непостоянства свойств скорее всего можно связать с технологическим процессом производства, а именно с осмолением арамидной бумаги при склейке заполнителя и обшивок. Заполнитель Аристар- Е закономерно показал значительно превосходящие значения по разрушающей нагрузке, модулю упругости и пределу прочности, таблица 11.

Таблица 11 Результаты на торцевое сжатие для толщины 6.2мм

Заполнитель	P_{max} , кгс	σ_c , кгс/мм ²
Аристид- Т	1067.96	10.64
Коэффициент вариации, %	9.19	8.86
Аристар- Е	3154.84	28.57
Коэффициент вариации, %	11.86	12.10

Результаты испытаний показали хорошую сходимость и небольшие разбросы в пределах 10% для заполнителя Аристид-Т, и в районе 12% для Аристар- Е. В ходе испытаний установлено что образцы с углепластиковыми сотами из-за своей жесткости не требуют дополнительного укрепления нагружаемых торцов. Прочность трехслойно панели с заполнителем Аристид-Т соизмерима с арамидной бумагой. Заполнитель Аристар- Е продемонстрировал схожие результаты с алюминиевыми сотами, однако значительно выигрывает в весе, вес образца (50x50мм) с углепластиковыми сотами 9.328 гр. против 12.798 гр. что ниже примерно на 28%.

Подводя итог можно сказать что данные системы материалов являются достаточно перспективными, полученные свойства по некоторым испытаниям значительно превосходят показатели традиционных материалов, для более детального вывода требуется проведение большего количества экспериментальных работ.

4.3.1 Исследование влагопоглощения перспективных наполнителей

Влагонасыщение образцов проводилось в климатической камере Discovery DY1600 при заданных термовлажностных условиях. Контроль влагонасыщения проводился методом периодического взвешивания на лабораторных весах Vibra HJR-420CE. Всего было проведено влагонасыщение 20 образцов, по 5 образца для каждого типа материала. Итоговая диаграмма зависимости % изменения веса образцов от количества дней выдержки представлена на рисунке 70.

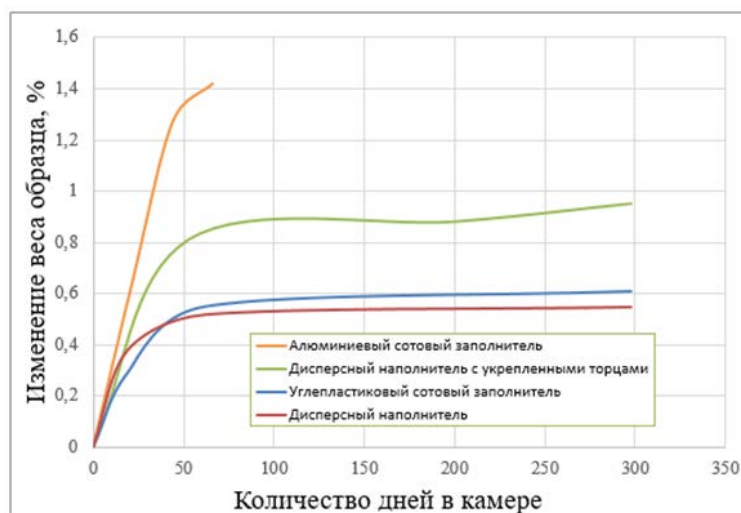


Рисунок 70 – Диаграмма влагонасыщения образцов

Анализируя полученные данные можно заметить, что все наполнители характеризуются резким ростом процентного содержания влаги до 50ти дней. Перспективные наполнители (зеленый, синий, красный маркер) демонстрируют меньшее поглощение влаги (~2.7 раза) за счет использования модифицированной органической матрицы, по сравнению с традиционной эпоксидной матрицей (рыжий маркер). Дисперсный наполнитель с укрепленными торцами поглощает в 1.6 раза больше влаги по сравнению с неукрепленным вариантом, укрепленные торцы поглощают большую часть накопленной влаги.

Меньшее поглощение влаги перспективными заполнителями может говорить о сохранении прочностных свойств этих материалов во влажной среде, а также о минимизации риска расслоений таких материалов в конструкции, и постоянстве свойств за счет отсутствия коррозионных процессов под влиянием накопления влаги в ячейках сотового заполнителя.

Выводы к разделу 4

Проведена всесторонняя крупномасштабная экспериментальная отработка применения разработанных методик, оформленных и регламентированных в виде выпущенных четырех стандартов ФАУ «ЦАГИ» (СТО СМК).

В процессе испытаний образцов трехслойных панелей с сотовым заполнителем из арамидной бумаги получены приемлемые результаты, полностью соответствующие пределам, обозначенным в ТУ на материал, с величинами коэффициента вариации экспериментальных данных для значительной части полученных результатов не превышающими 10% (что в 1.3 - 4.5 раза меньше величин коэффициента вариации результатов при использовании методик испытаний, установленных действующими стандартами ГОСТ и ASTM).

В процессе испытаний ПКМ трехслойных панелей с алюминиевым сотовым заполнителем на торцевое сжатие с учетом климатических факторов установлено, что методика испытаний позволяет получать расчетные значения показателей прочностных характеристик при достаточно небольшом разбросе результатов, с величинами коэффициента вариации для образцов при различных видах испытаний в следующих пределах: не более 8.4% - по разрушающей нагрузке и более 9.7% - по напряжениям.

Установлено, что равновесное состояние по влагонасыщению трехслойных панелей с алюминиевым сотовым заполнителем находится в пределах 1.5% от массы образца, которое достигается в период нахождения образца в климатической камере примерно равном 70 суткам. Разрушающая нагрузка для образцов указанных влагонасыщенных панелей в процессе дальнейших испытаний при лабораторной температуре (RTW) снижается примерно на 17% по отношению к средней величине разрушающей нагрузки для образцов в состоянии поставки при лабораторной

температуре (RTD). Испытания таких влагонасыщенных образцов при повышенной температуре (ETW) показали, что разрушающая нагрузка продолжает интенсивно снижаться, достигает величины на 30% ниже по отношению к уровню разрушающей нагрузки в условиях испытаний исходного образца RTD.

Проведенные испытания на сжатие и торцевое сжатие трехслойных панелей с сотовым наполнителем типа «Аристар-Е» (углепластиковые соты) и дисперсным наполнителем типа «Аристид-Т (0.1)» (на основе легковесных сферопластиков) показали, что данные системы материалов являются достаточно перспективными, полученные свойства по результатам некоторых испытаний значительно превосходят показатели традиционных материалов. Однако для более детальной оценки характеристик их статической прочности и долговечности требуется проведение дополнительных экспериментальных работ в значительном объеме.

Заполнитель типа «Аристид-Т (0.1)» при испытаниях с хорошей сходимостью и небольшими разбросами результатов (в пределах 10%) продемонстрировал примерно схожие свойства по модулю упругости и пределу прочности по сравнению с традиционным сотовым наполнителем из арамидной бумаги, но при увеличенной (примерно в два раза) стабильности этих показателей. Заполнитель типа «Аристар-Е» показал сопоставимые результаты (с разбросами в пределах 12%) прочностных показателей по сравнению с наполнителем с алюминиевыми сотами, однако значительно выигрывает за счет меньшей массы (примерно на 28%), большей жесткости и коррозионной стойкости углепластиковых сот.

Результаты исследований влагопоглощения перспективных наполнителей типа «Аристар-Е» и «Аристид-Т (0.1)» подтвердили, что оба типа наполнителей характеризуются резким ростом относительного (процентного) содержания влаги в начальный период нахождения их в климатической камере (до 50 суток) и сохранением показателя влагосодержания на достигнутом уровне в последующий период времени. При этом равновесное состояние по влагонасыщению трехслойных панелей с перспективными наполнителями достигается при значительно меньшем количестве поглощаемой влаги (примерно в 2.7 раза) по сравнению с алюминиевым сотовым наполнителем.

Заключение

В ходе проведенного исследования цель диссертационной работы, заключающаяся в обеспечении требуемой статической прочности элементов конструкции за счет повышения точности определения расчетных характеристик трехслойных материалов, успешно достигнута.

Разработаны методики получения прочностных характеристик трехслойных материалов при различных видах нагружения, предназначенные для испытания специально подготовленных образцов и образцов-спутников, а также позволяющие надежно и достоверно экспериментально определять требуемые расчетные характеристики при минимизированной погрешности результатов.

Применение данных методик доказало их эффективность: они позволили провести большой объем экспериментальных исследований различного вида нагружений серийных и перспективных панелей при величинах коэффициента вариации экспериментальных данных для значительной части полученных результатов в 1.3 - 4.5 раза меньше величин коэффициента вариации результатов при использовании методик испытаний, установленных действующими стандартами ГОСТ и ASTM.

В рамках математического моделирования с использованием конечно-элементного анализа удалось определить наилучший вариант укрепления нагружаемых торцов при испытании на торцевое сжатие. Методика упрочнения нагружаемых торцов апробирована на различных типах заполнителей трехслойных панелей, включая арамидную бумагу, алюминиевые сотовые заполнители, перспективные заполнители на основе высокодисперсных сферопластиков и углепластиковых сот, при величинах коэффициента вариации экспериментальных данных для значительной части полученных результатов, не превышающих 10%.

Доказана возможность безусловного применения указанной методики при проведении испытаний образцов-спутников, результаты испытаний которых (в отличие от специально подготовленных образцов) являются наиболее показательными (представительными), так как учитывают все технологические

особенности формирования реальной (опытной и серийной) конструкции ЛА из ПКМ.

Получены новые экспериментальные данные по упруго-прочностным характеристикам традиционных и перспективных материалов, включая данные по влагонасыщению и влиянию климатических факторов на прочность. Перспективные заполнители по типу сферопластиков демонстрируют сопоставимую с арамидными заполнителями прочностные характеристики при снижении влагопоглощения в 2.7 раз. Установлено, что применяемые в качестве заполнителей трехслойных панелей углепластиковые соты обеспечивают механические свойства аналогичные с алюминиевыми сотами при существенно меньшей массе (примерно на 30%). Экспериментально подтверждено, что после достижения равновесного состояния по влагонасыщению деградация прочностных свойств трехслойных панелей, на примере алюминиевой сотовой панели, достигает 17% (при лабораторной температуре испытания) и 30% (при повышенной).

Список литературы

- [1] N.J. Hoff, S.E. Mautner, Sandwich construction, Aeronautical Engineering Review 3 (1944) 1-7.
- [2] F. Neveu, B. Castanié, P. Olivier, The GAP methodology: A new way to design composite structure Materials & Design 172, 107755.
- [3] D. Guedra-Degeorges, P. Thevenet, S. Maison. Damage Tolerance of Aeronautical Sandwich Structures. A. Vautrin (ed.), Mechanics of Sandwich Structures, 29-36. Kluwer Academic Publisher 1998
- [4] В.И. Сливинский, Г.В. Ткаченко, М.В. Сливинский. Эффективность применения сотовых конструкций в летательных аппаратах, Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева.
- [5] Губанов Ю.В. Повышение массовой эффективности конструкции летательных аппаратов, за счет применения трехслойных сотовых элементов из композиционных материалов.
- [6] А.В. Кондратьев, А.А. Царицынский, М.Д. Нестеренко. Прогнозирование экономической эффективности применения в воздушных судах транспортной категории панельных сотовых конструкций, Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии, Выпуск 72, 2016
- [7] J. Zhang, Q. Qin, X. Han, W. Ai. The initial plastic failure of fully clamped geometrical asymmetric metal foam core sandwich beams. 2016. Composites Part B: Engineering, 87, 233-244.
- [8] B. Castani, J.-J. Barrau, J.-P. Jaouen. Theoretical and experimental analysis of asymmetric sandwich structures. 2002. Composite Structures, 55(3) 295-306.
- [9] D. Widagdo et al. Experimental flatwise tensile strength dataset of carbon fiber reinforced plastic sandwich panels with different core material preparations. 2019. Elsevier Inc.
- [10] Александров, А. Я. Расчет элементов авиационных конструкций. Трехслойные пластины и оболочки /А. Я. Александров и др. - М. : Машиностроение. 1985. –203с

- [11] Берсудский В.Е., Крысин В.Н. Производство сотовых конструкций. – М.: Машиностроение, 1966. – 276 с.
- [12] Берсудский В.Е., Крысин В.Н. Технология изготовления сотовых авиационных конструкций. – М.: Машиностроение, 1968. – 325 с.
- [13] П.В. Шершак, В.А. Косарев, Д.Ю. Рябовол. Гибридные обшивки в сэндвич-конструкциях панелей пола летательных аппаратов, Авиационные технологии №3(52) 2018
- [14] D. Nowakowski, M. Baran, J. Lisiecki, S. Kłysz, P. Synaszko. Examination of honeycomb core compliance in sandwich structure. Fatigue of aircraft structures. Volume 2019: I 11, pp.19-27
- [15] Yung-Chang Cheng, Huai-Chun Yeh & Cheng-Kang Lee (2021): Multi objective optimization of the honeycomb core in a honeycomb structure using uniform design and grey relational analysis, Engineering Optimization.
- [16] Sudharshan Anandan, Gurjot Dhaliwal, Shouvik Ganguly and K Chandrashekhara 2018: Investigation of sandwich composite failure under three-point bending: Simulation and experimental validation, Journal of Sandwich Structures & Materials.
- [17] Harun Akkus, Hayrettin Duzcukoglu and Omer Sinan Sahin (2017) Experimental research and use of finite elements method on mechanical behaviors of honeycomb structures assembled with epoxy-based adhesives reinforced with nanoparticles, Journal of Mechanical Science and Technology 31 (1) (2017) 165~170.
- [18] M. Giglio, A. Gilioli, A. Manes (2012) Numerical investigation of a three point bending test on sandwich panels with aluminum skins and Nomex™ honeycomb core, Computational Materials Science 56 pp. 69–78
- [19] Bolf, D.; Zamarin, A.; Krolo, P.; Hadjina, M. Experimental Evaluation of Shear Properties of Lightweight PVC Core for Marine Application Using Digital Image Correlation System. J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10, 280. <https://doi.org/10.3390/jmse10020280>

[20] Kausar, A.; Ahmad, I.; Rakha, S.A.; Eisa, M.H.; Diallo, A. State-Of-The-Art of Sandwich Composite Structures: Manufacturing—to—High Performance Applications. J. Compos. Sci. 2023, 7, 102. <https://doi.org/10.3390/jcs7030102>

[21] Jedral A. Review of testing methods dedicated for sandwich structures with Honecomb Core // Transactions on Aerospace Research. 2019. Vol. №2 P. 1-14. doi: 10.2478/tar-2019-0006

[22] Widagdo D. et all. Experimental flatwise tensile strength dataset of carbon fibre reinforced plastic sandwich panels with different core material preparations // 2020. Vol. 28, P. 105-115. doi: 10.1016/j.dib.2019.105055

[25] ISO 1922-2018. International Organization for Standardization, ISO 1922: Rigid Cellular Plastics – Determination of Shear Strength

[26] Abbadi A, et all. Experimental study on the fatigue behavior of honeycomb sandwich panels with artificial defects // Composite Structures. 2015. Vol 120. P. 394-405. doi: 10.1016/j.compstruct.2014.10.020

[27] Djemaoune Y. et all. Numerical investigation of open-hole damaged Nomex™ Honeycomb panel under three-point bending load // Scientific Technical Review. 2021. Vol.71, №2. P.14-18

[28] Nowakowski D. et all. Examination of honeycomb core compliance in sandwich structure // Fatigue of Aircraft Structures. 2019. Vol. 2019, №11. P.19-27

[29] М.В. Павлов, С.А. Титов, А.А. Свиридов, А.А. Бурдов. Экспериментальное определение действительных прочностных характеристик элементов трехслойных панелей вырезанных из агрегатов ЛА // Механика композиционных материалов и конструкций, 2024г

[30] Sun Z. et all. On compressive properties of composite sandwich structures with grid reinforced honeycomb core // Composites Part B: Engineering. 2016. Vol. 94. P. 245-252.

[31] Radtke TC, Charon A, Vodicka R. Hot/wet environmental degradation of honeycomb sandwich structure representative of F/A-18: flatwise tension strength, DSTO-TR-0908. Aeronautical and Maritime Research Laboratory; September 1999

- [32] LaPlante G. et all. Detection of water ingress in composite sandwich structures: A magnetic resonance approach //NDT & E International. 2005. Т.38 №6. С. 501-507
- [33] Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник, 2007, №5
- [34] Технические условия. Полимерсотопласты ПСП-1. ТУ 1-596-231-01.
- [35] Павлова С.А. Анализ контактного взаимодействия полимерного сотового заполнителя с несущими слоями в трёхслойных конструкциях // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20, № 1. С. 87-96. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-1-96
- [36] М.В. Павлов, А.В. Панков, А.А. Свиридов. Исследование эффективности критериев при оценке прочности композитных механических соединений // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. №43
- [37] Nettles A.T. Hot/wet open hole compression strength of carbon/epoxy laminates for launch vehicle applications. — Marshall Space Flight Center, Marshall Space Flight Center, Alabama, 2009. — 10 p.
- [38] Bieniaś J., Jakubczak P., Drożdżiel M., Surowska B. Interlaminar shear strength and failure analysis of aluminium-carbon laminates with a glass fiber interlayer after moisture absorption // Materials. — 2020. — Т. 13, № 13. — С. 2999.
- [39] Кириллов В.Н., Ефимов В.А., Шведкова А.К., Николаев Е.В. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ //Авиационные материалы и технологии. 2011. №4. С. 41–45.
- [40] Lepore M.A., Maligno A.R., Harris L. Effects of temperature in novel crimp-free based composite materials for aerospace applications: An experimental assessment // Composites Part C: Open Access. — 2021. — Vol. 6. — Article 100202. — ISSN 2666-6820. — DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100202.
- [41] Revathi A., Sendil Murugan M., Srihari S., Jagannathan N., Manjunatha C.M. Effect of hot-wet conditioning on the mechanical and thermal properties of IM7/8552 carbon fiber composite. Indian Journal of Advances in Chemical Science. 2014. Vol. 2, № 1. С. 84-88.]

[42] Wang Z. Recent advances in novel metallic honeycomb structure //Composites Part B: Engineering. – 2019. – V. 166. – PP. 731-741.

[43] Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В., Дедова Д.В. Численный анализ поведения трехслойной панели с сотовым наполнителем при наличии дефектов под действием динамической нагрузки // Строительная механика инженерных конструкций. – 2021. – №17(4). - С. 357 – 365.

[44] Wang Z., Li Z., Zhou W., Hui D. On the influence of structural defects for honeycomb structure // Composites Part B: Engineering. 2018. Vol. 142. P. 183–192.

[45] Chen D.H., Ozaki S. Stress concentration due to defects in a honeycomb structure // Composites Structures. 2009. V. 89. P. 52-59.

[46] Guo X., Gibson L. Behavior of intact and damaged honeycombs: a finite element study// Int J Mech Sci, 1999, vol. 41, pp. 85-105.

[47] Balaskó M., Sváb E., Molnár G., Veres I. Classification of defects in honeycomb composite structure of helicopter rotor blades // Nucl Instrum Methods A. 2005. T. 542. C. 45-51.

[48] Buitrago B.L., Santiuste C., Sánchez-Sáez S., Barbero E., Navarro C. Modelling of composite sandwich structures with honeycomb core subjected to high-velocity impact // Compos Struct. 2010 V.92PP2090-2096.

[49] Aktay L., Johnson A. F., Holzapfel M. Prediction of impact damage on sandwich composite panels. Computational Materials Science. 2005V.32 PP 252–260.

[50] Ivañez, I., Sanchez-Saez, S. Numerical modelling of the low-velocity impact response of composite sandwich beams with honeycomb core // Composites Structures. — 2013. — Vol. 106. — P. 716-727.

[51] Besant, T., Davies, G.A.O., Hitchings, D. Finite element modeling of low velocity impact of composite sandwich panels // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. — 2001. — Vol. 32. — P. 1189-1196.

[52] Cise, D., Lakes, R.S. Moisture ingress in honeycomb core sandwich panels // Journal of Materials Engineering and Performance. — 1997. — Vol. 6, No. 6. — P. 732-736.

[53] Kim G, Sterkenburg R, Waterloo T. Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets // Composite Structures. -2018. – Vol. 206. – P. 535-549.

[54] Scudamore P. J., Cantwell W. J. The effect of moisture and loading rate on the interfacial fracture properties of sandwich structures // Polymer Composites. 2002. vol. 23, № 3. С. 406–417.

[55] Крысин В.Н. Слоистые клееные конструкции в самолетостроении. –М.: Машиностроение, 1980. -228с.

[56] Прохоров Б.Ф., Кобелев В.Н. Трехслойные конструкции в судостроении. Л.: Судостроение, 1972. -334с.

[57] Kaman M. O., Solmaz M. Y., Turan K. Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels //Journal of composite materials. – 2010. – V. 44. – №. 24. – PP. 2819-2831.

[58] Zhang J., Ashby M. F. Buckling of honeycombs under in-plane biaxial stresses //International journal of mechanical sciences. – 1992. – V. 34. – №. 6. – PP. 491-509.

[59] Xiong J. Sandwich structures with prismatic and foam cores: A review //Advanced Engineering Materials. – 2019. – V. 21. – №. 1. – PP. 180.

[60] Rizov V., Shipsha A., Zenkert D. Indentation study of foam core sandwich composite panels / Composite structures. – 2005. – V. 69. – №. 1. – С. 95-102.

[61] Gupta N., Woldesenbet E. Characterization of flexural properties of syntactic foam core sandwich composites and effect of density variation / Journal of composite materials. – 2005. – V. 39. – №. 24. – С. 2197-2212.

[62] Steeves C. A., Fleck N. A. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part II: experimental investigation and numerical modelling / International Journal of Mechanical Sciences. – 2004. – V. 46. – №. 4. – С. 585-608.

[63] R.T. Sullins et al. Manual for structural stability analysis of sandwich plates and shells NASA CR-1457, 1969

[64] Ratcliffe, J. and W. C Jackson, “A Finite Element Analysis for Predicting the Residual Compressive Strength of Impact-Damaged Sandwich Panels,” NASA Technical Memorandum, NASA/TM-2008-215341, August 2008.

[65] Ratcliffe, J. and Leone F. “ABAQUS UMAT AND VUMAT HONEYCOMB MATERIAL MODEL” NASA Technical Memorandum, 2021

[66] ABAQUS 6.11 Analysis User’s Manual, Simulia, 2011.

[67] He R., Zhao C., Wang G., Zhang Z., Li F. FEA of in-plane compression of aluminum alloy honeycomb panels // Structures. -2023. V.49 – pp 267-280

[68] Balikoglu, F., Demircioglu, T.K. Mechanical properties of sandwich composites used for aerofoil shell structures of wind turbine blade // Icontech International Journal -2021. V. 5. - №1. Pp 26-37

[68] MIL-STD-401B (NOTICE 1), MILITARY STANDARD: Sandwich constructions and core materials; General Test Methods 1999

[69] Hahin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites // Journal Applied Mechanics. 1980. V. 47, p.329–334.

[70] Mei J., Ao Y., Jiang W., Liu J., Zhou Z., Huang W. Investigation on shear behaviors of carbon fiber composite sandwich panels with X-core // Marine Structures. - 2021. –V.77.

[71] Каблов Е.Н. Материалы для авиакосмической техники // Все материалы. Энциклопедический справочник, 2007, №5

[72] US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, AMT Airframe Handbook Vol. 1 (FAA-H8083-31), 2012

[73] ASTM C 297-04 Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions

[74] ASTM C 273-00 Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials

[75] ASTM C 365-00 Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores

[76] ASTM C 364-16 Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions

[77] ГОСТ Р 56783-2019 КОМПОЗИТЫ ПОЛИМЕРНЫЕ Метод определения предела прочности на растяжение перпендикулярно к плоскости «сэндвич»-конструкции

[78] ГОСТ Р 56651-2015 КОМПОЗИТЫ ПОЛИМЕРНЫЕ Метод определения характеристик прочности при сдвиге материалов внутреннего слоя «сэндвич»-конструкции

[79] ГОСТ Р 56816-2015 КОМПОЗИТЫ ПОЛИМЕРНЫЕ Определение механических характеристик при сжатии материала внутреннего слоя «сэндвич»-конструкции перпендикулярно к плоскости образца

[80] ГОСТ Р 56809-2015 КОМПОЗИТЫ ПОЛИМЕРНЫЕ Метод определения предела прочности на сжатие параллельно плоскости «сэндвич»-конструкции

[81] В.И. Голован, В.И. Гришин, М.В. Павлов, А.А. Свиридов. Исследование механических свойств сотовой панели при испытании на торцевое сжатие с учетом климатических факторов // Ученые записки ЦАГИ, Т. 55., №3. 2024 г.

[82] М.В. Павлов, С.А. Титов, А.А. Свиридов, А.А. Бурдов. Экспериментальное определение действительных прочностных характеристик элементов трехслойных панелей вырезанных из агрегатов ЛА // Механика композиционных материалов и конструкций, №1, 2025 г.

[83] Butukuri R.R. et al. Evaluation of skin-core adhesion bond of out-of-autoclave honeycomb sandwich structures // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 2012. Vol. 31, No. 5. P. 331–339. DOI: 10.1177/0731684412437267.

[84] Grove S.M., Popham E. and Miles M.E. An investigation of the skin/core bond in honeycomb sandwich structures using statistical experimentation techniques // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2006. Vol. 37, No. 5. P. 804–812. DOI: 10.1016/j.compositesa.2005.07.005.

[85] Rion J., Leterrier Y. and Manson J.-A.E. Prediction of the adhesive fillet size for skin to honeycomb core bonding in ultra-light sandwich structures // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2008. Vol. 39, No. 9. P. 1547–1555. DOI: 10.1016/j.compositesa.2008.05.022.

[86] LaPlante G., Marble A. E., MacMillan B., Lee-Sullivan P., Colpitts B. G., Balcom B. J. Detection of water ingress in composite sandwich structures: a magnetic resonance approach // NDT & E International. 2005. Vol. 38, No. 6. P. 501-507. ISSN 0963-8695. DOI: 10.1016/j.ndteint.2005.01.006

[87] Shafizadeh J. E., Seferis J. C., Chesmar E. F., Geyer R. Evaluation of the In-Service Performance Behavior of Honeycomb Composite Sandwich Structures // Journal of Materials Engineering and Performance. 1999. Т. 8, № 6. С. 661–668. doi:10.1361/105994999770346422.

[88] Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. –М. Машиностроение, 1982. -152с.

[89] Сливинский В.И., Зевако В.С., Ткаченко Г.В., Карпикова О.А. Сотовые заполнители в конструкциях авиационно-космического назначения // Космические наука и технология. 2008. Т.14 №3. С.101-107

[90] В.И. Сливинский, М.Е. Харченко, А.В. Кондратьев, В.В. Гаврилко. Углесотопласт- легкий и прочный заполнитель трехслойной конструкции космического назначения // Решетневские чтения. сб. материалов XVI междунар. науч. конф, Красноярск 2013 Ч.1. С.96-98

[91] Гладков Ю.А. Особенности расчета сотовых конструкций –М. Наука, 1976 с. 278-290

[92] Гладков Ю.А. Исследование прочности и устойчивости трехслойных цилиндрических панелей с жестким заполнителем. Труды ЦАГИ 1977, С. 31-48

[93] Сугаков В.А. Проектирование сжатых трехслойных сотовых конструкций минимального веса с учетом конструктивно-технологических ограничений. – Ученые записки ЦАГИ, 1974, с 66-76

[94] Иерусалимский К.М. Несущая способность и оптимальные параметры шарнирно опертых по контуру трехслойных пластин с сотовым заполнителем при сжатии. – Труды ЦАГИ, 1968, 27 с.

[95] Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем: Справочник –М. Машиностроение, 1991. – 272 с.

- [96] И.А. Бригер Прочность. Устойчивость. Колебания. /И.А. Бригер, Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1968. -612 с.
- [97] Александров А.Я., Трофимова Э.П. Местная устойчивость трехслойных пластин с сотовым заполнителем при продольном сжатии// Расчеты элементов авиационных конструкций, М.: Машиностроение, 1965 с.3-72.
- [98] Александров А.Я., Трофимова Э.П. Определение приведенных упругих параметров сотовых заполнителей трехслойных панелей // Вопросы расчета элементов авиационных конструкций, М.: Оборонгиз, 1959 с.3-26
- [99] Александров А.Я. Расчет элементов авиационных конструкций. Трехслойные пластины и оболочки. – М.: Машиностроение. 1985 -203с.
- [100] Александров А.Я. Конструкции с заполнителем из пенопласта/ А.Я. Александров и др. –М.: Машиностроение, 1972. -211с.
- [101] Александров А.Я., Куршин Л.И. Трехслойные пластинки и оболочки // Прочность, устойчивость, колебания. –М.: Машиностроение, 1968. С. 243-326.
- [102] Александров А.Я., Григолин Э.И., Куршин Л.И. Расчет элементов авиационных конструкций. –М.: Машиностроение. 1965.- 274 с.
- [103] Замула Г.Н., Колесник К.А. Способы повышения весовой эффективности применения композиционных конструкций // Полет. Общероссийский научно технический журнал – 2018. - №10. – С. 14-24.
- [104] Малышева Г.В., Гращенков Д.В., Гузева Т.А. Оценка технологичности использования клеев и клеевых препрегов при изготовлении трехслойных панелей // Авиационные материалы и технологии. – 2018. - №4(53). – С.26-30. DOI: 10/18577/2071-9140-2018-0-4-26-30.
- [105] Jang, J.-W. et al. Test and evaluation procedure of foam core materials for composite ships // Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety. 2020. 26(3), p. 286-296. DOI: 10.7837/kosomes.2020.26.3.286
- [106] Nurul Lailarul M. et al. Study sifat mechanic composite sandwich divinycell foam dengan method vacuum assisted resin infusion // Proceedings seminar national riset technology terapan/ 2021. e-ISSN:2747-1217

[107] Samad W.A., Warsame A.A., Khan A. An experimental study on the edgewise compressive failure of paper honeycomb sandwich panels with respect to various aspect ratios // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 346. DOI: 10.1088/1757-899X/346/1/012040

[108] Lavrenkov S., Smirnov I., Kravchenko D., Beklemysheva K., Vasyukov A. Numerical modeling of complex geometry thin structures under vibrational testing // Supercomputing Frontiers and Inovations. 2024. 11(4). DOI:10.14529/jsfi240402

[109] Aksenov V., Vasyukov A., Beklemysheva K. Acquiring elastic properties of thin composite structure from vibrational testing data // Journal of Inverse and III-posed Problems. 2024. 32(3). DOI: 10.1515/jiip-2022-0081

[110] Beklemysheva K.A., Petrov I.B. Damage Modeling in Hybrid Composites Subject to Low-Speed Impact // Math Models Comput Simul. 2019. 11. DOI:10.1134/S2070048219030074

Приложение А

СТО СМК ФАУ «ЦАГИ»

Методика испытаний трехслойных панелей на растяжение



СТО СМК 7- 157-2023

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор


К.И. Сыпало

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Конструкционные полимерные композиционные материалы

Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей

Редакция № 1

Дата введения « 18 » декабря 2023 г.,
приказ № 790 от « 18 » декабря 2023 г.

ФАУ «ЦАГИ»

2023

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

Лист согласования

№	Должность	И. О. Фамилия	Подпись	Дата
1				15.12.2023
2				13.12.2023
3				07.12.2023
4				04.12.2023
5				06.12.2023

№	Должность	И. О. Фамилия	Подпись	Дата
РАЗРАБОТАЛ				
1				30.11.2023
2				29.11.2023
3				28.11.2023
4	Научный сотрудник отдела № 5 НИО-18	М. В. Павлов		28.11.2023
ПРОВЕРИЛ				
5				05.12.2023

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

Предисловие

1. РАЗРАБОТАН И УТВЕРЖДЕН Федеральным автономным учреждением «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского»
2. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ
3. ДЕРЖАТЕЛЬ ПОДЛИННИКА документа – отдел стандартизации и унификации службы качества
4. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОВЕРКИ – не реже, чем через 5 лет.
5. РАССЫЛКА документа – подлинник и контрольный экземпляр в отдел стандартизации и унификации, учтенные экземпляры в подразделения института, в соответствии с приказом о внедрении СТО СМК.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

Содержание

1	Назначение и область применения.....	5
2	Нормативные ссылки.....	5
3	Термины, определения и сокращения.....	6
4	Обозначения	7
5	Объект испытаний.....	7
6	Метод испытаний	7
7	Образцы для испытаний	8
8	Средства испытаний	9
9	Кондиционирование образцов	13
10	Порядок проведения испытаний	13
11	Обработка результатов испытаний	15
12	Оформление результатов испытаний.....	15
13	Требования по безопасности.....	16
	Приложение А	17
	Приложение Б.....	20
	Приложение В.....	21
	Библиография	22
	Лист ознакомления.....	23

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

1 Назначение и область применения

Стандарт устанавливает метод определения свойств материала трехслойных панелей при проведении испытаний на растяжение в условиях нормальной, пониженной и повышенной температур при монотонном статическом нагружении образцов до разрушения.

Настоящий стандарт используется для определения предела прочности при растяжении трехслойной панели в направлении перпендикулярном плоскости панели. Характеристики и свойства, определяемые рассматриваемым методом испытаний, вводят в технические условия на материал, используют при паспортизации, создании баз данных, а также в исследованиях и разработках при создании авиационной техники.

Данный документ является стандартом организации в системе менеджмента качества ФАУ «ЦАГИ», разработанным с учетом требований ГОСТ Р ИСО 9000, ГОСТ Р ИСО 9001 и ДП СМК 4-00.

Требования настоящего документа являются обязательными для всех работников института, чья деятельность касается исследований характеристик и свойств трехслойных панелей из полимерных композиционных материалов.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ Р ИСО 9000-2015	Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь
ГОСТ Р ИСО 9001-2015	Системы менеджмента качества. Требования
ГОСТ 28840-90	Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

ГОСТ 6507-90	Микрометры. Технические условия
ГОСТ 166-89	Штангенциркули. Технические условия
ГОСТ 12423-2013	Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)
ГОСТ 12.4.021-75	Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Общие требования
ДП СМК 4-00-2023	Система менеджмента качества. Руководство по качеству организации и обеспечения исследований, испытаний, производства и других работ, выполняемых в институте
ГОСТ 14359-69	Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования.

Все указанные документы используются в работе в их последней действующей редакции.

3 Термины, определения и сокращения

В настоящем стандарте используются следующие термины с соответствующими определениями:

Адгезионное разрушение – разрушение, при котором разрушение клеевого шва происходит по границе клеевой композиции;

Когезионное разрушение – разрушение клеевого шва происходит по массиву соединяемых элементов или клеевой композиции.

В настоящем стандарте применяются следующие сокращения:

ГОСТ	–	Государственный стандарт;
ИСО	–	Международная организация по стандартизации;
ЛА	–	Летательный аппарат (летательные аппараты);
НИО	–	Научно-исследовательское отделение;
ПКМ	–	Полимерный композиционный материал;
РД	–	Руководящий документ;
СК	–	Служба качества;

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

СМК	–	Система менеджмента качества;
СТО	–	Стандарт организации;
ТР	–	Технический регламент;
ФАУ ЦАГИ	–	Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского».

4 Обозначения

В настоящем стандарте применяются следующие обозначения:

4.1 $\sigma_{\text{вт}}$, кгс/мм²: Предел прочности при растяжении;

4.2 P_{max} , кгс: Растягивающая нагрузка, вызвавшая разрушение образца (разрывная нагрузка);

4.3 A , мм²: Площадь поперечного сечения образца.

5 Объект испытаний

Объектом испытаний являются трехслойные (сотовые) панели с обшивкой из ПКМ армированного углеродными, стеклянными или органическими волокнами, наполнитель – непрерывного или ячеистого типа. Панели имеют общую толщину, укладку слоев армирующих наполнителей в обшивке и наполнитель аналогичный тому, который используется в композитных конструкциях конкретных изделий.

6 Метод испытаний

Метод заключается в определении свойств трехслойной панели при воздействии одноосной растягивающей нагрузки перпендикулярно обшивкам с установленной скоростью деформирования до разрушения (разрыва). Основные положения настоящего метода испытаний соответствуют (гармонизированы) ASTM C 297-04 [1].

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

7 Образцы для испытаний

7.1 Стандартом предусмотрено проведение испытаний образцов трехслойных панелей в виде прямоугольных или круглых пластин (рисунок 1). Для непрерывных заполнителей, таких как пенопласт и подобные материалы, минимальная площадь поперечного сечения должна составлять не менее 625 мм². Для сотовых заполнителей рекомендуется соблюдать указания по соотношению толщины заполнителя и площади образца, представленные в таблице 1. При выходе размеров панели за пределы, указанные в таблице 1, испытания следует проводить по специальной программе, согласованной с Заказчиком.

Таблица 1 – Рекомендуемая минимальная площадь поперечного сечения

Минимальная толщина заполнителя, мм	Максимальная толщина заполнителя, мм	Минимальная площадь поперечного сечения, мм ²
–	3.0	625
3.0	6.0	2 500
6.0	9.0	5 625

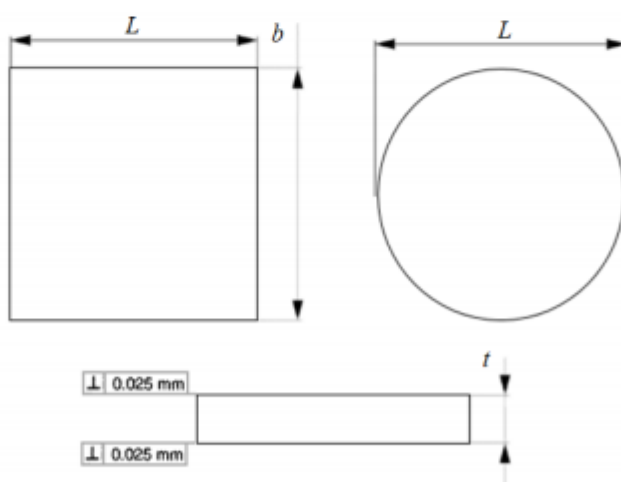


Рисунок 1 – Эскиз образца

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

7.2 Для одних условий испытания количество образцов должно быть не менее пяти.

7.3 Механическую обработку образцов выполнять, руководствуясь Техническим регламентом [2]. При вырезании образца из панели большего размера необходимо тщательно подобрать метод механической обработки, позволяющий исключить образование зазубрин, подрезов, грубых, неровных поверхностей, а также расслоений. Окончательные размеры получать точным выпиливанием, фрезерованием или шлифованием с обязательной подачей охлаждающей жидкости в обрабатываемую зону. Общие требования к результатам механической обработки заключаются в следующем: обработанные торцы образца должны быть плоскими и находиться в пределах перпендикулярности, указанных на рисунке 1.

7.4 Изготовленные образцы маркировать номером партии и порядковым номером образца на обшивке. Маркировка должна не только позволять отличать образцы друг от друга и указывать на их происхождение, но также идентифицировать их по условиям испытаний. Маркировка не должна влиять на выполнение и результат испытаний, но и при этом не должна повреждаться.

7.5 Образец должен быть приклеен к пластинам оснастки (Приложение А). При подготовке поверхности оснастки и вклеивании образца в оснастку необходимо руководствоваться Порядком, приведенным в Приложении Б.

8 Средства испытаний

При проведении испытаний образцов используются:

8.1 Микрометры и штангенциркули – для измерений длины, ширины и толщины образца следует пользоваться мерительным инструментом, который обеспечивает возможность определения указанных размеров с точностью до 1% от измеряемой величины. Для измерения толщины образца использовать

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

микрометр типов МК или МЛ по ГОСТ 6507. Диапазон измерения от 0 до 25 мм с погрешностью до ± 0.01 мм. Измерения длины и ширины образца выполнять штангенциркулем по ГОСТ 166 с подходящим диапазоном измерения и погрешностью до ± 0.1 мм.

8.2 Испытательная машина, которая должна отвечать требованиям ГОСТ 28840 и позволять осуществлять нагружение образца с постоянной скоростью, обеспечивая измерение нагрузки и перемещения с точностью до $\pm 1\%$ от измеряемой величины.

Основные элементы и узлы испытательной машины:

- неподвижная траверса с захватом для образца.
- силовозбудитель, предназначенный для перемещения активного захвата с управляемой скоростью по отношению к неподвижной траверсе и способный преодолевать при этом сопротивление деформации образца.
- силоизмеритель механическое, электромеханическое или механико-гидравлическое устройство, позволяющее измерять и регистрировать нагрузку, создаваемую силовозбудителем для растяжения испытуемого образца. Данное устройство должно быть безынерционным (в пределах реализуемых скоростей нагружения) отображать текущую величину нагрузки с точностью до $\pm 1\%$ от измеренной величины.
- регистрирующее устройство – электронная аппаратура, обеспечивающая синхронную запись сигналов силоизмерителя и датчика перемещения активного захвата, что позволяет строить диаграммы "нагрузка–удлинение" для испытываемых образцов.
- активный (подвижный) захват образца, связанный силовым механизмом перемещения с управляемой скоростью.

Захваты должны обеспечивать надежное крепление образцов в положении, когда ось их симметрии совпадает с осью нагружения.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

Поверку и градуировку средств измерения испытательной машины необходимо осуществлять в соответствии с нормами Методических указаний [3].

8.3 Секундомер для измерения длительности нагружения до разрушения с точностью до 1 с.

8.4 Термокамера испытательной машины. Реализуемый рабочий диапазон температур термокамеры: от минус 60⁰С до 160⁰С. Термокамера должна обеспечивать в рабочем пространстве, находящемся между захватами испытательной машины, любую задаваемую температуру нагрева или охлаждения образца из указанного диапазона. Допускаемое отклонение от заданной температуры – не более $\pm 3^{\circ}\text{C}$ в течение периода температурной стабилизации.

8.5 Камера для кондиционирования. При кондиционировании образцов в условиях, отличающихся от лабораторных, требуется камера для кондиционирования, позволяющая создавать и поддерживать в пределах $\pm 3^{\circ}\text{C}$ на заданном уровне температуру в диапазоне от минус 60⁰С до 160⁰С и относительную влажность от 20% до 98% в пределах $\pm 3\%$. Условия в камере осуществляются либо автоматически, либо вручную через регулярные интервалы времени.

8.6 Пластины оснастки должны быть самовыравнивающимися относительно линии нагружения (максимальное отклонение ≤ 0.025 мм), рисунок 2. Самовыравнивание достигается за счет шарнирных соединений оснастки, образец выравнивается под общим весом сборки (Приложение А). Данный вид соединения исключает смещение оси нагружения. Пластины должны быть достаточно жесткими, чтобы удерживать исходное состояние трехслойной пластины под нагрузкой. Установлено, что пластины из стали толщиной 20 мм обладают необходимой жесткостью.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

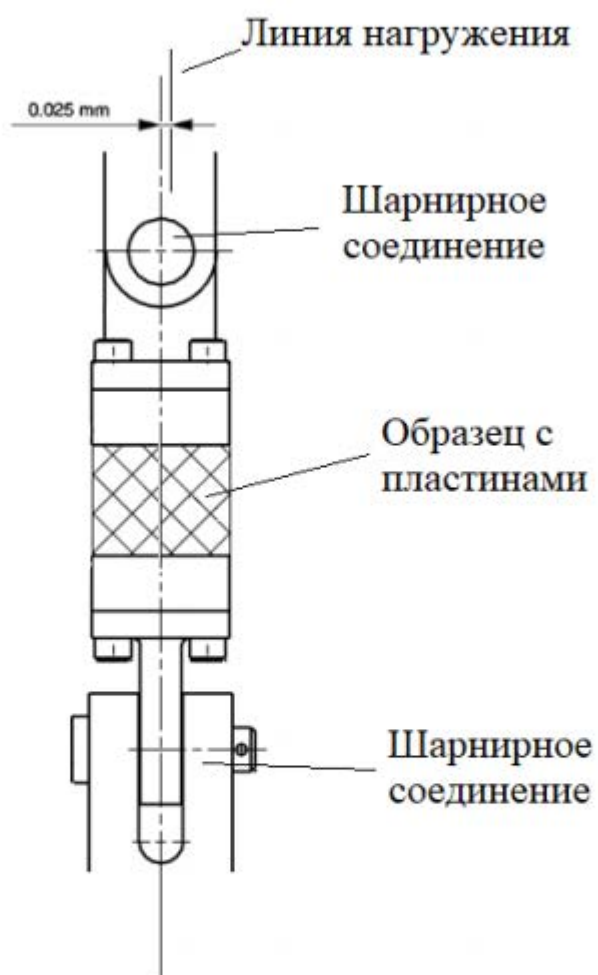


Рисунок 2 – Схема нагружения образца

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

9 Кондиционирование образцов

Кондиционирование образцов перед испытаниями следует проводить в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423, если в нормативно-технической документации на материал нет других указаний. Кондиционирование образцов, заключающееся в равновесном влагонасыщении при заданном уровне относительной влажности и температуры, рекомендуется выполнять в специализированных камерах (см. 8.5). В тех случаях, когда Заказчик не регламентировал условий кондиционирования, образцы считаются готовыми к испытанию в состоянии поставки.

В протоколе проведения испытаний (Приложение В) должны быть описаны условия кондиционирования образцов с указанием содержания в образцах влаги. Если регламентированного кондиционирования не проводилось, то в протоколе проведения испытаний необходимо указать: «Образцы не кондиционированные, содержание влаги неизвестно».

10 Порядок проведения испытаний

10.1 При необходимости, кондиционировать образцы в соответствии с разделом 9 в условиях, согласованных с Заказчиком. Если условия кондиционирования отличаются от параметров окружающей среды в испытательной лаборатории, то образцы до проведения испытаний содержать в среде с контролируемыми параметрами.

10.2 При нагреве или охлаждении температуру, скорость нагрева и время выдержки при заданной температуре перед испытаниями установить в соответствии с техническим заданием на испытания.

10.3 Нагреть или охладить образец до требуемой температуры испытаний. Контроль температуры осуществлять с помощью термопар. Длительность подбирать экспериментально посредством создания в контролируемой зоне

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

образца условий стационарного теплообмена при заданной температуре и сохранения этих условий в течение 5 мин, когда температура в контролируемой зоне практически не меняется и находится в пределах допуска на различие температур $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Если нагрева и охлаждения не требуется, то испытания проводить в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423.

10.4 Установить на испытательной машине требуемую скорость перемещения активного захвата, соответствующую скорости деформации, указанной в технических условиях. При отсутствии указания скорости нагружения в нормативных документах на материал рассчитать ее, исходя из следующего условия: предельная (разрушающая) деформации образца данного типа и материала должна быть достигнута в процессе монотонного растяжения образца в течение $3 \div 6$ мин. Рекомендуемая скорость нагружения для образцов является 0.5 мм/мин. После испытаний первых образцов из партии значение скорости уточнить и добиться требуемого значения.

10.5 Допустимые моды разрушения: разрушение, которое произошло в любой области по толщине заполнителя; когезионное или адгезионное разрушение на границе между заполнителем и обшивкой трехслойной панели; разрушение обшивки панели, при котором часть слоев остается на разрывной пластине, а другая на трехслойной панели.

Разрушение клеевого слоя между пластинами оснастки и образцом является не допустимой модой разрушения.

10.6 Провести серию испытаний образцов с заданной скоростью перемещения активного захвата до разрыва. При испытаниях непрерывно измерять и регистрировать нагрузку, удлинение образца и время процесса нагружения. Удлинение образца регистрировать по величине перемещения активного захвата.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

10.7 Выполнить фотографирование испытанных образцов.

10.8 В протокол проведения испытаний занести разрушающую нагрузку, диаграмму «нагрузка–удлинение» каждого образца, а также описать вид разрушения образцов.

11 Обработка результатов испытаний

11.1 Предел прочности на растяжение $\sigma_{вт}$, кгс/мм², вычисляют по формуле:

$$\sigma_{вт} = \frac{P_{max}}{A},$$

где:

P_{max} – максимальная нагрузка, кгс;

A – площадь поперечного сечения, мм².

11.2 Определить по ГОСТ 14359 выборочные среднее и коэффициент вариации.

11.3 Внести в протокол проведения испытаний результаты испытаний в соответствии с рекомендациями раздела 12.

12 Оформление результатов испытаний

Протокол проведения испытаний должен включать следующие сведения:

12.1 Ссылка на настоящий стандарт и основание для проведения испытаний.

12.2 Описание испытываемых материалов и условия кондиционирования образцов.

12.3 Характеристика испытательного оборудования: информационно-измерительное оборудование, частота опроса датчиков; марка и мощность испытательной машины, скорость нагружения.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

12.4 Относительная влажность и температура воздуха в испытательной лаборатории.

12.5 Условия испытаний, температура образца.

12.6 Размеры (ширина, длина и толщина) каждого образца.

12.7 Значение предела прочности каждого образца.

12.8 Фамилии и имена исполнителей и дата испытания.

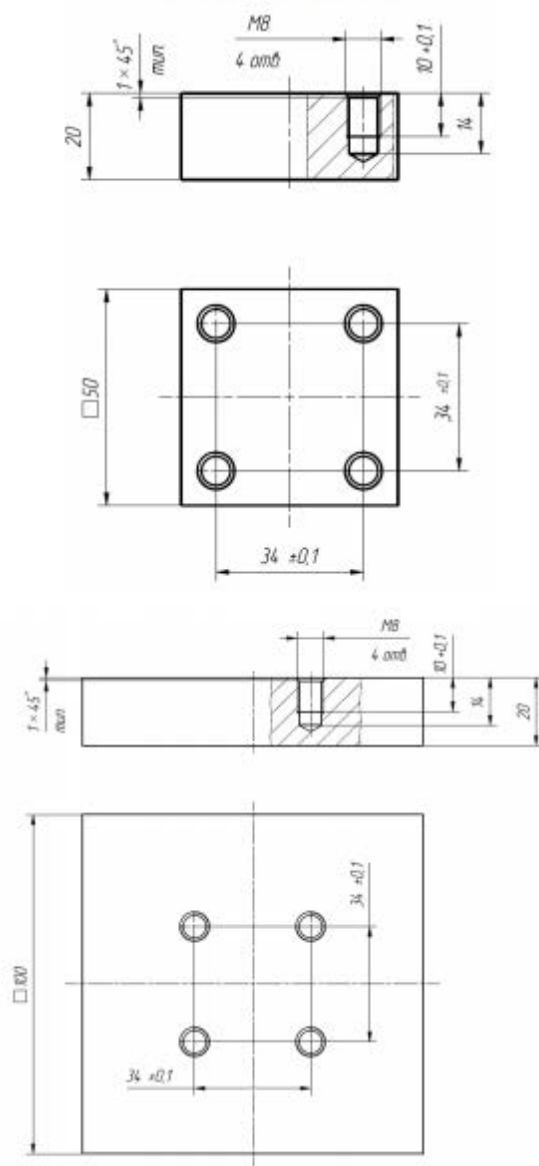
13 Требования по безопасности

Данная методика не содержит предписаний по технике безопасности и охране здоровья. Если таковые окажутся необходимы при использовании данного стандарта, то это является ответственностью пользователя, который обязан самостоятельно разработать и установить все ограничения и средства, защищающие персонал, перед выполнением описываемых в стандарте процедур. Наиболее важными направлениями этой разработки являются:

- меры безопасности от осколков при работе с хрупкими материалами;
- приемы безопасной работы с электроприборами, нагревателями и испытательными машинами;
- обеспечение экологической безопасности при испытании материалов, выделяющих продукты разложения при повышенных температурах, ГОСТ 12.4.021.

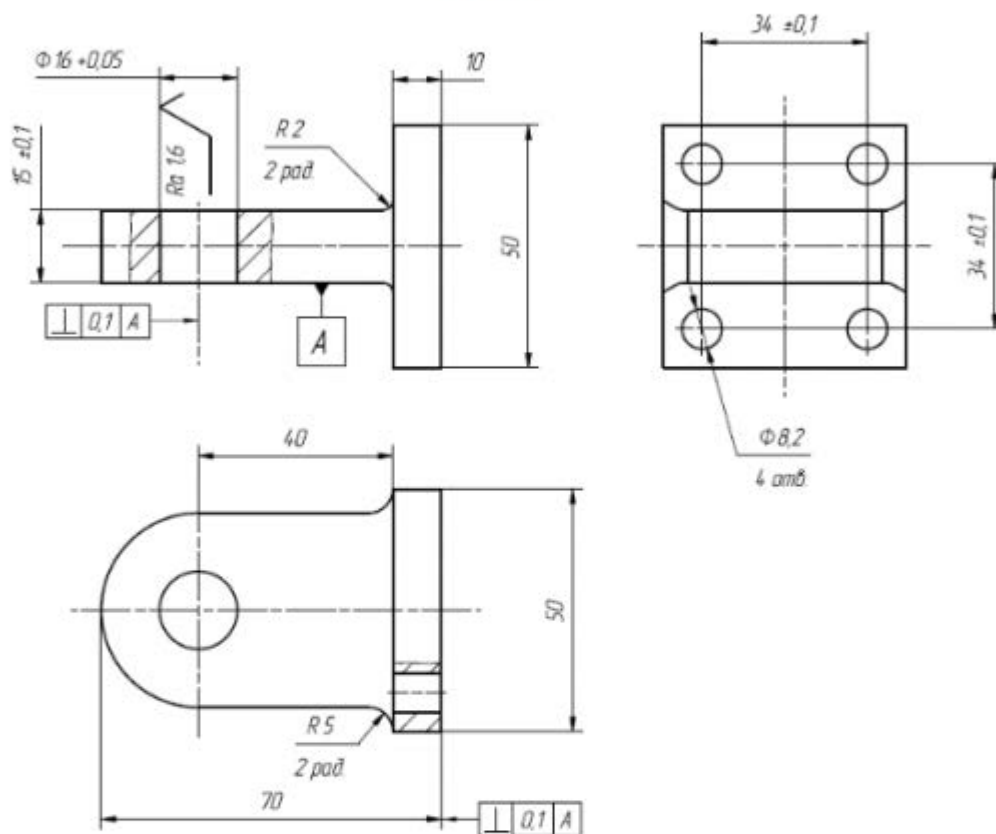
ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

Пластины оснастки



ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

Фланец



ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

Приложение Б

Порядок подготовки поверхности и вклейка образца в оснастку

В.1 Для достижения требуемой механической прочности в клеевом соединении рекомендуется следовать следующим рекомендациям при подготовке поверхностей оснастки и при вклеивании образца.

В.2 Подготовка оснастки: Поверхности пластин оснастки (Приложение А) необходимо зашлифовать наждачной бумагой с рекомендуемой зернистостью Р-60. Для удаления частиц пыли и абразива следует использовать мягкую щетку или сжатый воздух. Поверхность должна быть очищена от жиров, масел или других смазочных материалов с помощью ацетона. Для протирки рекомендуется использовать только безворсовые салфетки.

В.3 Подготовка образца: Поверхности склейки образца следует зашлифовать наждачной бумагой с рекомендуемой зернистостью Р-120. Чтобы удалить частицы пыли и абразива, следует использовать мягкую щетку или сжатый воздух. Поверхность образца необходимо очистить от жиров, масел или других смазочных материалов с помощью спиртовых салфеток.

В.4 Рекомендуется использовать двухкомпонентный эпоксидный клей, полимеризуемый при лабораторной температуре. Нанести клей тонким и равномерным слоем на все склеиваемые поверхности в соответствии с инструкцией производителя. Поместить образец на нижнюю пластину оснастки, накрыть верхней пластиной и зафиксировать получившуюся сборку от смещения, убедиться, что образец находится в правильном положении и при необходимости скорректировать положение элементов. Уложить сборку в вакуумный мешок, создать вакуум $0.8 - 1 \text{ кг/см}^2$ и оставить при лабораторной температуре на 24 часа. После извлечения образца из вакуумного мешка, излишки клея следует удалить с торцов, используя наждачную бумагу с рекомендуемой зернистостью Р-80.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

Приложение В (обязательное)

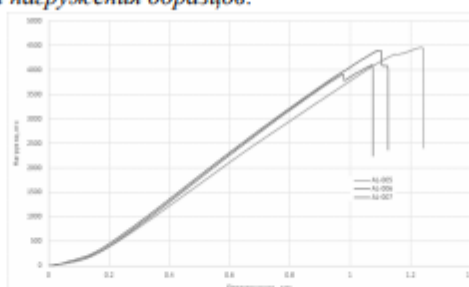
Форма протокола проведения испытаний

Адрес Телефон	Аккредитация		
	Номер	Дата	Организация
Заказчик			
Организация	Адрес	Телефон	Фамилия, И.О., должность

Протокол № __ от _____

- 1 Метод проведения испытаний (номер стандарта испытаний и ссылка на него):
- 2 Образцы для испытания (тип/маркировка образцов, описание материала, укладка слоев ПКМ и тип заполнителя, условия кондиционирования):
- 3 Испытательное оборудование, условия испытаний (температурные режимы и скорость нагружения), кондиционирование образцов, температура и влажность в испытательной лаборатории:

- 4 Диаграмма нагружения образцов:



- 5 Результаты испытаний на:

№ образца	Длина L , мм	Ширина b , мм	Толщина t , мм	A , мм ²	P_{max} , кгс	σ_T , кгс/мм ²	Вид разрушения
Среднее значение							
Коэффициент вариации, %							

Исполнители и дата испытаний

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-157-2023	
СК		Редакция №	1

Библиография

- [1] ASTM C 297-04 Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Constructions.
- [2] ТР–1.4.1773–87 Механическая обработка деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов. Типовые операции технологических процессов
- [3] РД 50–482–84 Методические указания. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Методика поверки

Приложение Б

СТО СМК ФАУ «ЦАГИ»

Методика испытаний трехслойных панелей на сдвиг



СТО СМК 7-158-2023

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор


К.И. Сыпало

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Конструкционные полимерные композиционные материалы

Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей

Редакция № 1

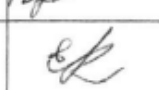
Дата введения « 18 » декабря 2023 г.,
приказ № 791 от « 18 » декабря 2023 г.

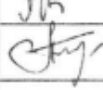
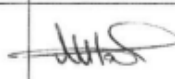
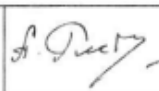
ФГУ «ЦАГИ»

2023

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

№	Должность	И. О. Фамилия	Подпись	Дата
1				13.12.2023
2				13.12.2023
3				07.12.2023
4				04.12.2023
5				06.12.2023

№	Должность	И. О. Фамилия	Подпись	Дата
РАЗРАБОТАЛ				
1				30.11.2023
2				20.11.2023
3				28.11.2023
4	Научный сотрудник отдела № 5 НИО-18	М. В. Павлов		22.11.2023
ПРОВЕРИЛ				
5				05.12.2023

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

ПРЕДИСЛОВИЕ

1. РАЗРАБОТАН И УТВЕРЖДЕН Федеральным автономным учреждением «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского»
2. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ
3. ДЕРЖАТЕЛЬ ПОДЛИННИКА документа – отдел стандартизации и унификации службы качества
4. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОВЕРКИ – не реже, чем через 5 лет.
5. РАССЫЛКА документа – подлинник и контрольный экземпляр в отдел стандартизации и унификации, учтенные экземпляры в подразделения института, в соответствии с приказом о внедрении СТО СМК.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-158-2023	
СК	Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	Редакция №	1

Содержание

1	Назначение и область применения.....	5
2	Нормативные ссылки.....	5
3	Термины, определения и сокращения.....	6
4	Обозначения.....	7
5	Объект испытаний.....	7
6	Метод испытаний.....	8
7	Образцы для испытаний.....	8
8	Средства испытаний.....	10
9	Кондиционирование образцов.....	13
10	Порядок проведения испытаний.....	13
11	Обработка результатов испытаний.....	15
12	Оформление результатов испытаний.....	16
13	Требования по безопасности.....	16
	Приложение А.....	18
	Приложение Б.....	21
	Приложение В.....	22
	Библиография.....	23
	Лист ознакомления.....	24

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

1 Назначение и область применения

Стандарт устанавливает метод определения свойств материала трехслойных панелей при проведении испытаний на сдвиг в условиях нормальной, пониженной и повышенной температур при монотонном статическом нагружении образцов до разрушения.

Настоящий стандарт используется для определения предела прочности и модуля сдвига при нагружении обшивок панели разнонаправленными напряжениями, параллельными ее оси. Испытание может быть проведено на трехслойных панелях или непосредственно на заполнителе, приклеенном к пластинам, через которое происходит нагружение. Характеристики и свойства, определяемые рассматриваемым методом испытаний, вводят в технические условия на материал, используют при паспортизации, создании баз данных, а также в исследованиях и разработках при создании авиационной техники.

Данный документ является стандартом организации в системе менеджмента качества ФАУ «ЦАГИ», разработанным с учетом требований ГОСТ Р ИСО 9000, ГОСТ Р ИСО 9001 и ДП СМК 4-00.

Требования настоящего документа являются обязательными для всех работников института, чья деятельность касается исследований характеристик и свойств трехслойных панелей из полимерных композиционных материалов.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ Р ИСО 9000-2015	Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь
----------------------	--

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

ГОСТ Р ИСО 9001-2015	Системы менеджмента качества. Требования
ГОСТ 28840-90	Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования
ГОСТ 6507-90	Микрометры. Технические условия
ГОСТ 166-89	Штангенциркули. Технические условия
ГОСТ 12423-2013	Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)
ГОСТ 12.4.021-75	Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Общие требования
ДП СМК 4-00-2023	Система менеджмента качества. Руководство по качеству организации и обеспечения исследований, испытаний, производства и других работ, выполняемых в институте
ГОСТ 14359-69	Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования.

Все указанные документы используются в работе в их последней действующей редакции.

3 Термины, определения и сокращения

В настоящем стандарте используются следующие термины с соответствующими определениями:

Адгезионное разрушение – разрушение, при котором разрушение клеевого шва происходит по границе клеевой композиции;

Когезионное разрушение – разрушение клеевого шва происходит по массиву соединяемых элементов или клеевой композиции.

В настоящем стандарте применяются следующие сокращения:

ГОСТ	– Государственный стандарт;
ИСО	– Международная организация по стандартизации;

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-158-2023	
СК	Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	Редакция №	1

ЛА	– Летательный аппарат (летательные аппараты);
НИО	– Научно-исследовательское отделение;
ПКМ	– Полимерный композиционный материал;
РД	– Руководящий документ;
СК	– Служба качества;
СМК	– Система менеджмента качества;
СТО	– Стандарт организации;
ТР	– Технический регламент;
ФАУ ЦАГИ	– Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского».

4 Обозначения

В настоящем стандарте применяются следующие обозначения:

- 4.1 **t , мм:** Измеренная толщина образца.
- 4.2 **L , мм:** Измеренная длина образца.
- 4.3 **b , мм:** Измеренная ширина образца.
- 4.4 **τ , кгс/мм²:** Предел прочности на сдвиг.
- 4.5 **P , кгс:** Максимальная нагрузка, вызвавшая разрушение образца (срезная нагрузка).
- 4.6 **G , кгс/мм²:** Модуль сдвига.
- 4.7 **$S - \Delta P / \Delta u$, кгс/мм:** Наклон начального участка диаграммы «нагрузка-перемещение».
- 4.8 **u , мм:** Перемещение нагружающих плит.

5 Объект испытаний

Объектом испытаний являются трехслойные (сотовые) панели с обшивкой из ПКМ армированного углеродными, стеклянными или органическими волокнами, наполнитель – непрерывного или ячеистого типа. Панели имеют общую толщину, укладку слоев армирующих наполнителей в

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

обшивке и наполнитель аналогичный тому, который используется в композитных конструкциях конкретных изделий.

6 Метод испытаний

Метод заключается в определении свойств трехслойной панели при воздействии разнонаправленной растягивающей нагрузки, приложенной параллельно обшивкам, с установленной скоростью деформирования до разрушения. Условия проведения испытаний не приводит к чистому сдвигу наполнителя, но длина образца выбрана таким образом, чтобы влияние вторичных напряжений было минимальным.

Основные положения настоящего метода испытаний соответствуют (гармонизированы) ASTM C 273-00 [1].

7 Образцы для испытаний

7.1 Стандартом предусмотрено проведение испытаний образцов трехслойных панелей в виде прямоугольных пластин, рисунок 1. Ширина (b) образца должна быть не менее 50 мм, длина (L) не менее двенадцатикратной толщины (t), за исключением случаев, когда испытания проводятся по специальной программе, согласованной с Заказчиком.

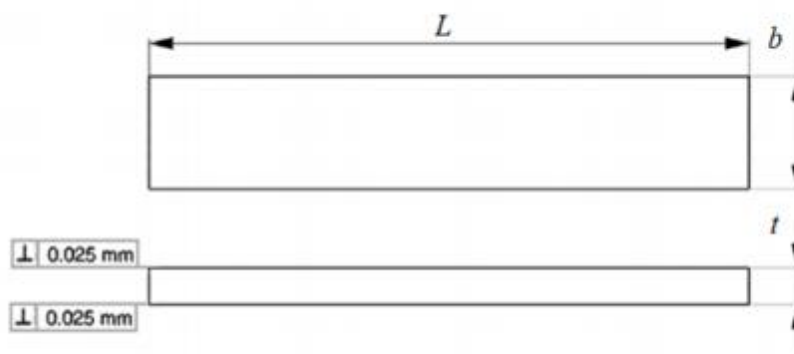


Рисунок 1 – Образец трехслойной панели для испытаний

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

7.2 Для одних условий испытания количество образцов должно быть не менее пяти.

7.3 Механическую обработку образцов выполнять, руководствуясь техническим регламентом [2]. При вырезании образца из панели большего размера необходимо тщательно подобрать метод механической обработки, позволяющий исключить образование зазубрин, подрезов, грубых, неровных поверхностей, а также расслоений. Окончательные размеры получать точным выпиливанием, фрезерованием, или шлифованием с обязательной подачей охлаждающей жидкости в обрабатываемую зону. Общие требования к результатам механической обработки заключаются в следующем: обработанные торцы образца должны быть плоскими и находиться в пределах перпендикулярности, указанных на рисунке 1.

7.4 Изготовленные образцы маркировать номером партии и порядковым номером образца на обшивке. Маркировка должна не только позволять отличать образцы друг от друга и указывать на их происхождение, но также идентифицировать их по условиям испытаний. Маркировка не должна влиять на выполнение и результат испытаний, но и при этом не должна повреждаться.

7.5 Образец должен быть приклеен к пластинам оснастки (Приложение А). При подготовке поверхности оснастки и вклеивании образца в оснастку необходимо руководствоваться Порядком, приведенным в Приложении Б.

7.6 Если материал заполнителя имеет характеристики сдвига, зависящие от направления действия напряжений, должны быть проведены дополнительные испытания для определения сдвиговых свойств трехслойной панели в каждом из направлений.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

8 Средства испытаний

При проведении испытаний образцов используются:

8.1 Микрометры и штангенциркули – для измерений длины, ширины и толщины образца следует пользоваться мерительным инструментом, который обеспечивает возможность определения указанных размеров с точностью до $\pm 1\%$ от измеряемой величины. Для измерения толщины образца использовать микрометр типов МК или МЛ по ГОСТ 6507. Диапазон измерения от 0 до 25 мм с погрешностью до ± 0.01 мм. Измерения длины и ширины образца выполнять штангенциркулем по ГОСТ 166 с подходящим диапазоном измерения и погрешностью до ± 0.1 мм.

8.2 Тензорезисторы для измерения деформаций, типы которых и схемы их расположения на образце должны быть согласованы с Заказчиком. Тензорезистор может быть расположен на любой стороне образца, но как можно ближе к его центру, рисунок 2. Допускается измерение деформаций по взаимному смещению пластин оснастки, рисунок 2.

8.3 Испытательная машина, которая должна отвечать требованиям ГОСТ 28840 и позволять осуществлять нагружение образца с постоянной скоростью обеспечивая измерение нагрузки и перемещения с точностью до $\pm 1\%$ от измеряемой величины.

Основные элементы и узлы испытательной машины:

- неподвижная траверса с захватом для образца.
- силовозбудитель, предназначенный для перемещения активного захвата с управляемой скоростью по отношению к неподвижной траверсе и способный преодолевать при этом сопротивление деформации образца.
- силоизмеритель – механическое, электромеханическое или механико-гидравлическое устройство, позволяющее измерять и регистрировать нагрузку, создаваемую силовозбудителем для растяжения

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

испытываемого образца. Данное устройство должно быть безынерционным (в пределах реализуемых скоростей нагружения) отображать текущую величину нагрузки с точностью до $\pm 1\%$ от измеренной величины.

– регистрирующее устройство – электронная аппаратура, обеспечивающая синхронную запись сигналов силоизмерителя и датчика перемещения активного захвата, что позволяет строить диаграммы "нагрузка–удлинение" для испытываемых образцов.

– активный (подвижный) захват образца, связанный силовым механизмом перемещения с управляемой скоростью.

Захваты должны обеспечивать надежное крепление образцов в положении, когда ось их симметрии совпадает с осью нагружения.

Поверку и градуировку средств измерения испытательной машины необходимо осуществлять в соответствии с нормами Методических указаний [3].

8.4 Секундомер для измерения длительности нагружения до разрушения с точностью до 1 с.

8.5 Термокамера испытательной машины. Реализуемый рабочий диапазон температур термокамеры: от минус 60°C до 160°C . Термокамера должна обеспечивать в рабочем пространстве, находящемся между захватами испытательной машины, любую задаваемую температуру нагрева или охлаждения образца из указанного диапазона. Допускаемое отклонение от заданной температуры – не более $\pm 3^{\circ}\text{C}$ в течение периода температурной стабилизации.

8.6 Камера для кондиционирования. При кондиционировании образцов в условиях, отличающихся от лабораторных, требуется камера для кондиционирования, позволяющая создавать и поддерживать в пределах $\pm 3^{\circ}\text{C}$ на заданном уровне температуру в диапазоне от минус 60°C до 160°C и

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

относительную влажность от 20% до 98% в пределах $\pm 3\%$. Условия в камере осуществляются либо автоматически, либо вручную через регулярные интервалы времени.

8.7 Толщина пластин оснастки может варьироваться в зависимости от прочности трехслойной панели. Установлено, что изгибная жесткость не менее 2.67 мм/мм^2 ширины пластины на миллиметр толщины трехслойной панели является достаточной.

Длина пластины оснастки должна быть такой, чтобы обеспечить прохождение растягивающей нагрузки через диагонально противоположные углы трехслойной панели, согласно линии нагружения, представленной на рисунке 2.



Рисунок 2 – Схема нагружения образца

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

9 Кондиционирование образцов

Кондиционирование образцов перед испытаниями следует проводить в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423, если в нормативно-технической документации на материал нет других указаний. Кондиционирование образцов, заключающееся в равновесном влагонасыщении при заданном уровне относительной влажности и температуры, рекомендуется выполнять в специализированных камерах (см. 8.6). В тех случаях, когда Заказчик не регламентировал условий кондиционирования, образцы считаются готовыми к испытанию в состоянии поставки.

В протоколе проведения испытаний (Приложение В) должны быть описаны условия кондиционирования образцов с указанием содержания в образцах влаги. Если регламентированного кондиционирования не проводилось, то в протоколе проведения испытаний необходимо указать: «Образцы не кондиционированные, содержание влаги неизвестно».

10 Порядок проведения испытаний

10.1 При необходимости, кондиционировать образцы в соответствии с разделом 9 в условиях, согласованных с Заказчиком. Если условия кондиционирования отличаются от параметров окружающей среды в испытательной лаборатории, то образцы до проведения испытаний содержать в среде с контролируруемыми параметрами.

10.2 При нагреве или охлаждении температуру, скорость нагрева и время выдержки при заданной температуре перед испытаниями установить в соответствии с техническим заданием на испытания.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

10.3 Нагреть или охладить образец до требуемой температуры испытаний. Контроль температуры осуществлять с помощью термопар. Длительность подбирать экспериментально посредством создания в контролируемой зоне образца условий стационарного теплообмена при заданной температуре и сохранения этих условий в течение 5 мин, когда температура в контролируемой зоне практически не меняется и находится в пределах допуска на различие температур $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

Если нагрева и охлаждения не требуется, то испытания проводить в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423.

10.4 Измерить длину (L), толщину (t) и ширину (b) образца в трех точках по длине образца, средние значение занести в протокол проведения испытаний.

10.5 Установить на испытательной машине требуемую скорость перемещения активного захвата, соответствующую скорости деформации, указанной в технических условиях. При отсутствии указания скорости нагружения в нормативных документах на материал рассчитать ее, исходя из следующего условия: предельная (разрушающая) деформации образца данного типа и материала должна быть достигнута в процессе монотонного растяжения образца в течение $3 \div 6$ мин. Рекомендуемая скорость нагружения для образцов является 0.5 мм/мин. После испытаний первых образцов из партии значение скорости уточнить и добиться требуемого значения.

10.6 Установить сборку образца и оснастки в испытательную машину согласно рисунку 2. Нагрузить образец с постоянной скоростью деформирования до максимального значения силы.

10.7 Допустимой модой разрушения образца считается разрушение по заполнителю трехслойной панели. Образцы, разрушение которых произошло

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-158-2023	
СК	Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	Редакция №	1

в следствии когезионного или адгезионного типа разрушения, считаются не зачетными.

10.8 Провести серию испытаний образцов с заданной скоростью перемещения активного захвата до разрушения образцов. При испытаниях непрерывно измерять и регистрировать нагрузку, удлинение образца и время процесса нагружения. Измерение деформаций проводить при помощи тензорезистора, фиксирующего деформации в пластинах.

10.9 Выполнить фотографирование испытанных образцов.

10.10 В протокол проведения испытаний занести разрушающую нагрузку, диаграмму «нагрузка–удлинение» каждого образца, а также описать вид разрушения образцов.

11 Обработка результатов испытаний

11.1 Сдвиговые напряжения τ , кгс/мм², вычисляют по формуле:

$$\tau = \frac{P}{Lb},$$

где:

P – максимальная нагрузка, кгс;

L – измеренная длина образца, мм;

b – измеренная ширина образца, мм.

11.2 Модуль сдвига G , кгс/мм², вычисляют по формуле:

$$G = \frac{St}{Lb},$$

где:

$S = \Delta P / \Delta u$ – наклон начального участка (0.1-0.3%) нагрузка-перемещение, кгс/мм;

u – перемещение пластин, мм;

t – толщина образца, мм;

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

L – измеренная длина образца, мм;

b – измеренная ширина образца, мм.

11.3 Определить по ГОСТ 14359 выборочные среднее и коэффициент вариации.

11.4 Внести в протокол проведения испытаний результаты испытаний в соответствии с рекомендациями раздела 12.

12 Оформление результатов испытаний

Протокол проведения испытаний должен включать следующие сведения:

12.1 Ссылка на настоящий стандарт и основание для проведения испытаний.

12.2 Описание испытываемых материалов и условия кондиционирования образцов.

12.3 Характеристика испытательного оборудования: информационно-измерительное оборудование, частота опроса датчиков; марка и мощность испытательной машины, скорость нагружения.

12.4 Относительная влажность и температура воздуха в испытательной лаборатории.

12.5 Условия испытаний, температура образца.

12.6 Размеры (ширина, длина и толщина) каждого образца.

12.7 Значение предела прочности каждого образца.

12.8 Фамилии и имена исполнителей и дата испытания.

13 Требования по безопасности

Данная методика не содержит предписаний по технике безопасности и охране здоровья. Если таковые окажутся необходимы при использовании данного стандарта, то это является ответственностью пользователя, который обязан самостоятельно разработать и установить все ограничения и средства,

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-158-2023	
СК	Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	Редакция №	1

защищающие персонал, перед выполнением описываемых в стандарте процедур.

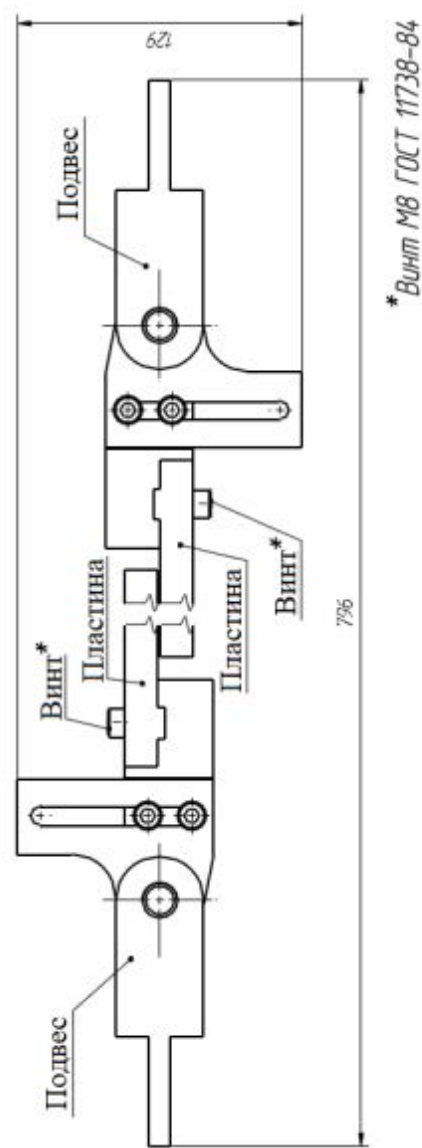
Наиболее важными направлениями этой разработки являются:

- меры безопасности от осколков при работе с хрупкими материалами;
- приемы безопасной работы с электроприборами, нагревателями и испытательными машинами;
- обеспечение экологической безопасности при испытании материалов, выделяющих продукты разложения при повышенных температурах, ГОСТ 12.4.021.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

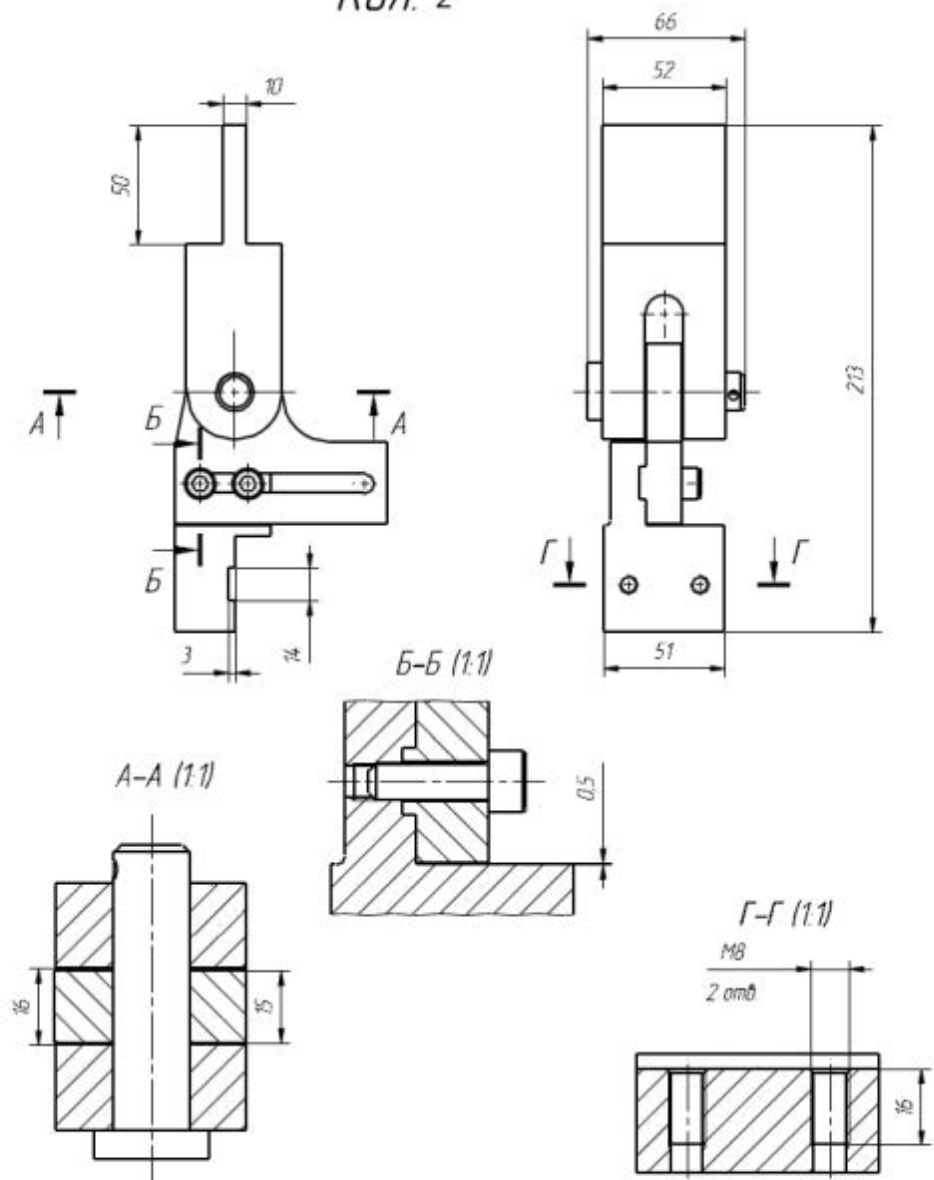
Приложение А

Эскиз оснастки для испытаний на сдвиг



ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

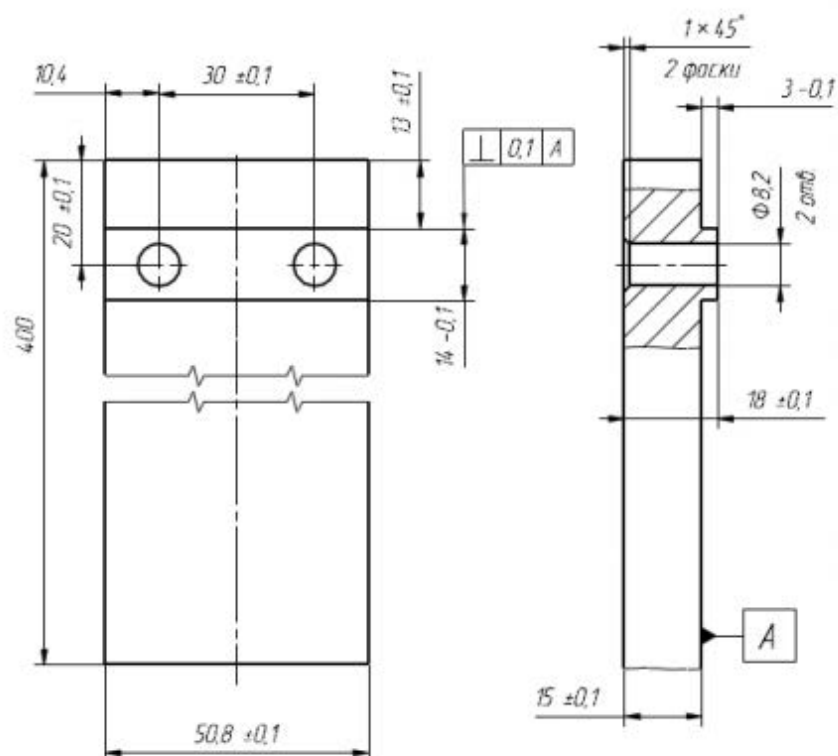
Подвес Кол. 2



ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

Пластина

Кол. 2



ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

Приложение Б

Порядок подготовки поверхности и вклейка образца в оснастку

В.1 Для достижения требуемой механической прочности в клеевом соединении рекомендуется следовать следующим рекомендациям при подготовке поверхностей оснастки и при вклеивании образца.

В.2 Подготовка оснастки: Поверхности пластин оснастки (Приложение А) необходимо зашлифовать наждачной бумагой с рекомендуемой зернистостью Р-60. Для удаления частиц пыли и абразива следует использовать мягкую щетку или сжатый воздух. Поверхность должна быть очищена от жиров, масел или других смазочных материалов с помощью ацетона. Для протирки рекомендуется использовать только безворсовые салфетки.

В.3 Подготовка образца: Поверхности склейки образца следует зашлифовать наждачной бумагой с рекомендуемой зернистостью Р-120. Чтобы удалить частицы пыли и абразива, следует использовать мягкую щетку или сжатый воздух. Поверхность образца необходимо очистить от жиров, масел или других смазочных материалов с помощью спиртовых салфеток.

В.4 Рекомендуется использовать двухкомпонентный эпоксидный клей, полимеризуемый при лабораторной температуре. Нанести клей тонким и равномерным слоем на все склеиваемые поверхности в соответствии с инструкцией производителя. Поместить образец на нижнюю пластину оснастки, накрыть верхней пластиной и зафиксировать получившуюся сборку от смещения, убедиться, что образец находится в правильном положении и при необходимости скорректировать положение элементов. Уложить сборку в вакуумный мешок, создать вакуум $0.8 - 1 \text{ кг/см}^2$ и оставить при лабораторной температуре на 24 часа. После извлечения образца из вакуумного мешка, излишки клея следует удалить с торцов, используя наждачную бумагу с рекомендуемой зернистостью Р-80.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

Приложение В (обязательное)

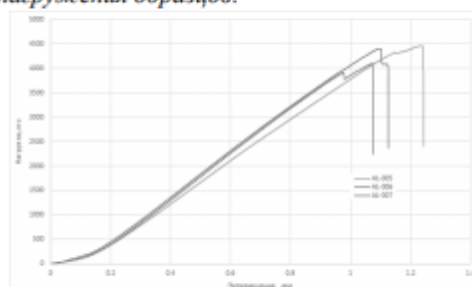
Форма протокола проведения испытаний

Адрес Телефон	Аккредитация		
	Номер	Дата	Организация
Заказчик			
Организация	Адрес	Телефон	Фамилия, И.О., должность

Протокол № __ от _____

- 1 Метод проведения испытаний (номер стандарта испытаний и ссылка на него):
- 2 Образцы для испытания (тип/маркировка образцов, описание материала, укладка слоев ПКМ и тип заполнителя, условия кондиционирования):
- 3 Испытательное оборудование, условия испытаний (температурные режимы и скорость нагружения), кондиционирование образцов, температура и влажность в испытательной лаборатории:

- 4 Диаграмма нагружения образцов:



- 5 Результаты испытаний на:

№ образца	Длина L , мм	Ширина b , мм	Толщина t , мм	A , мм ²	P_{max} , кгс	σ_L , кгс/мм ²	Вид разрушения
Среднее значение							
Коэффициент вариации, %							

Исполнители и дата

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-158-2023	
СК		Редакция №	1

Библиография

- [1] ASTM C 273-00 Standard Test Method for Shear Properties of Sandwich Core Materials
- [2] ТР–1.4.1773–87 Механическая обработка деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов. Типовые операции технологических процессов
- [3] РД 50–482–84 Методические указания. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Методика поверки

Приложение В

СТО СМК ФАУ «ЦАГИ»

Методика испытаний трехслойных панелей на сжатие



СТО СМК 7-159-2023

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор


К.И. Сыпало

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

**Конструкционные полимерные композиционные
материалы**

Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей

Редакция № 1

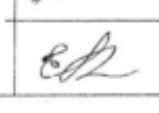
Дата введения « 18 » декабря 2023 г.,
приказ № 792 от « 18 » декабря 2023 г.

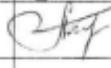
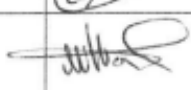
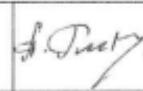
ФАУ «ЦАГИ»

2023

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

Лист согласования

№	Должность	И. О. Фамилия	Подпись	Дата
1				15.12.2023
2				19.12.2023
3				07.12.2023
4				04.12.2023
5				06.12.2023

№	Должность	И. О. Фамилия	Подпись	Дата
РАЗРАБОТАЛ				
1				20.11.2023
2				29.11.2023
3				28.11.2023
4	Научный сотрудник отдела № 5 НИО-18	М. В. Павлов		28.11.2023
ПРОВЕРИЛ				
5				05.12.2023

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

Предисловие

1. РАЗРАБОТАН И УТВЕРЖДЕН Федеральным автономным учреждением «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского»
2. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ
3. ДЕРЖАТЕЛЬ ПОДЛИННИКА документа – отдел стандартизации и унификации службы качества
4. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОВЕРКИ – не реже, чем через 5 лет.
5. РАССЫЛКА документа – подлинник и контрольный экземпляр в отдел стандартизации и унификации, учтенные экземпляры в подразделения института, в соответствии с приказом о внедрении СТО СМК.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-159-2023	
СК	Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	Редакция №	1

Содержание

1	Назначение и область применения.....	5
2	Нормативные ссылки.....	5
3	Термины, определения и сокращения	6
4	Обозначения	7
5	Объект испытаний	7
6	Метод испытаний.....	7
7	Образцы для испытаний.....	8
8	Средства испытаний	10
9	Кондиционирование образцов.....	12
10	Порядок проведения испытаний	13
11	Обработка результатов испытаний	14
12	Оформление результатов испытаний.....	15
13	Требования по безопасности	16
	Приложение А	17
	Приложение Б.....	18
	Библиография	19
	Лист ознакомления.....	20

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

1 Назначение и область применения

Стандарт устанавливает метод определения свойств материала трехслойных панелей при проведении испытаний на сжатие в условиях нормальной, пониженной и повышенной температур при монотонном статическом нагружении образцов до разрушения.

Настоящий стандарт используется для определения предела прочности при сжатии трехслойной панели в направлении перпендикулярном плоскости панели. Характеристики и свойства, определяемые рассматриваемым методом испытаний, вводят в технические условия на материал, используют при паспортизации, создании баз данных, а также в исследованиях и разработках при создании авиационной техники.

Данный документ является стандартом организации в системе менеджмента качества ФАУ «ЦАГИ», разработанным с учетом требований ГОСТ Р ИСО 9000, ГОСТ Р ИСО 9001 и ДП СМК 4-00.

Требования настоящего документа являются обязательными для всех работников института, чья деятельность касается исследований характеристик и свойств трехслойных панелей из полимерных композиционных материалов.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ Р ИСО 9000-2015	Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь
ГОСТ Р ИСО 9001-2015	Системы менеджмента качества. Требования
ГОСТ 28840-90	Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

ГОСТ 6507-90	Микрометры. Технические условия
ГОСТ 166-89	Штангенциркули. Технические условия
ГОСТ 12423-2013	Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)
ГОСТ 12.4.021-75	Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Общие требования
ДП СМК 4-00-2023	Система менеджмента качества. Руководство по качеству организации и обеспечения исследований, испытаний, производства и других работ, выполняемых в институте
ГОСТ 14359-69	Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования.

Все указанные документы используются в работе в их последней действующей редакции.

3 Термины, определения и сокращения

В настоящем стандарте используются термины и определения, приведенные в ГОСТ Р ИСО 9000.

В настоящем стандарте применяются следующие сокращения:

ГОСТ	– Государственный стандарт;
ИСО	– Международная организация по стандартизации;
ЛА	– Летательный аппарат (летательные аппараты);
НИО	– Научно-исследовательское отделение;
ПКМ	– Полимерный композиционный материал;
РД	– Руководящий документ;
СК	– Служба качества
СМК	– Система менеджмента качества;
СТО	– Стандарт организации;
ТР	– Технический регламент;

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

ФАУ ЦАГИ – Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского».

4 Обозначения

В настоящем стандарте применяются следующие обозначения:

4.1 σ , кгс/мм²: Предел прочности при сжатии.

4.2 P , кгс: Наибольшая нагрузка, вызвавшая разрушение образца (разрывная нагрузка).

4.3 A , мм²: Площадь поперечного сечения образца.

4.4 E , кгс/мм²: Модуль сжатия.

4.5 $S - \Delta P / \Delta u$, кгс/мм: Наклон начального участка нагрузка-перемещение.

4.6 u , мм: Перемещение нагружающих плит.

4.7 t , мм: Измеренная толщина образца.

5 Объект испытаний

Объектом испытаний являются трехслойные (сотовые) панели с обшивкой из ПКМ армированного углеродными, стеклянными или органическими волокнами, наполнитель – непрерывного или ячеистого типа. Панели имеют общую толщину, укладку слоев армирующих наполнителей в обшивке и наполнитель аналогичный тому, который используется в композитных конструкциях конкретных изделий.

6 Метод испытаний

Метод заключается в определении свойств трехслойной панели при воздействии одноосной сжимающей нагрузки перпендикулярно обшивкам с установленной скоростью деформирования до разрушения. Основные

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

положения настоящего метода испытаний соответствуют (гармонизированы) ASTM C 364-00 [1].

7 Образцы для испытаний

7.1 Стандартом предусмотрено проведение испытаний образцов трехслойных панелей в виде прямоугольных или круглых пластин (рисунок 1). Для непрерывных заполнителей таких как пенопласт и подобные материалы, минимальная площадь поперечного сечения должна составлять не менее 625 мм². Для сотовых заполнителей рекомендуется соблюдать указания по соотношению толщины заполнителя и площадью образца, представленные в таблице 1. При выходе размеров панели за пределы, указанные в таблице 1, испытания следует проводить по специальной программе, согласованной с Заказчиком.

Таблица 1 – Рекомендуемая минимальная площадь поперечного сечения

Минимальная толщина заполнителя, мм	Максимальная толщина заполнителя, мм	Минимальная площадь поперечного сечения, мм ²
—	6.0	2 580
6.0	-	5 800

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

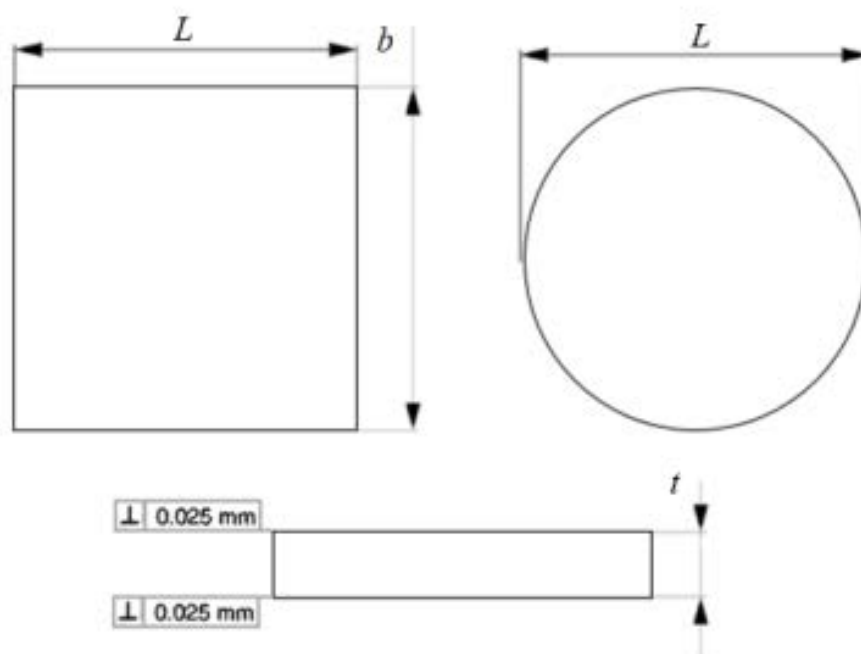


Рисунок 1 – Эскиз образца

7.2 Для одних условий испытания количество образцов должно быть не менее пяти.

7.3 Механическую обработку образцов выполнять, руководствуясь техническим регламентом [2]. При вырезании образца из панели большего размера необходимо тщательно подобрать метод механической обработки, позволяющий исключить образование зазубрин, подрезов, грубых, неровных поверхностей, а также расслоений. Окончательные размеры получать точным выпиливанием, фрезерованием, или шлифованием с обязательной подачей охлаждающей жидкости в обрабатываемую зону. Общие требования к результатам механической обработки заключаются в следующем: обработанные

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

торцы образца должны быть плоскими и находиться в пределах перпендикулярности, указанных на рисунке 1.

7.4 Для предотвращения местного смятия трехслойной панели в процессе нагружения, открытые стороны заполнителя могут быть усилены нанесением тонкого слоя связующего, аналогичного используемому при формовке трехслойной панели, или обшивкой, аналогичной той, что используется в трехслойной панели. В случае, если торцы трехслойной панели были укреплены, тип испытания в протоколе должен быть указан как «стабилизированное сжатие».

7.5 Изготовленные образцы маркировать номером партии и порядковым номером образца на обшивке. Маркировка должна не только позволять отличать образцы друг от друга и указывать на их происхождение, но также идентифицировать их по условиям испытаний. Маркировка не должна влиять на выполнение и результат испытаний, но при этом не должна повреждаться.

8 Средства испытаний

При проведении испытаний образцов используются:

8.1 Микрометры и штангенциркули – для измерений длины, ширины и толщины образца следует пользоваться мерительным инструментом, который обеспечивает возможность определения указанных размеров с точностью до 1% от измеряемой величины. Для измерения толщины образца использовать микрометр типов МК или МЛ по ГОСТ 6507. Диапазон измерения от 0 до 25 мм с погрешностью до ± 0.01 мм. Измерения длины и ширины образца выполнять штангенциркулем по ГОСТ 166 с подходящим диапазоном измерения и погрешностью до ± 0.1 мм.

8.2 Испытательная машина, которая должна отвечать требованиям ГОСТ 28840, позволяющая осуществлять нагружение образца с постоянной скоростью

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

обеспечивая измерение нагрузки и перемещения с точностью до $\pm 1\%$ от измеряемой величины.

Основные элементы и узлы испытательной машины:

- неподвижная траверса с захватом для образца.
- силовозбудитель, предназначенный для перемещения активного захвата с управляемой скоростью по отношению к неподвижной траверсе и способный преодолевать при этом сопротивление деформации образца.
- силоизмеритель механическое, электромеханическое или механико-гидравлическое устройство, позволяющее измерять и регистрировать нагрузку, создаваемую силовозбудителем при сжатии испытуемого образца. Данное устройство должно быть безынерционным (в пределах реализуемых скоростей нагружения) отображать текущую величину нагрузки с точностью до $\pm 1\%$ от измеренной величины.
- регистрирующее устройство – электронная аппаратура, обеспечивающая синхронную запись сигналов силоизмерителя и датчика перемещения активного захвата, что позволяет строить диаграммы "нагрузка–удлинение" для испытываемых образцов.
- активный (подвижный) захват образца, связанный силовым механизмом перемещения с управляемой скоростью.

Захваты должны обеспечивать надежное крепление образцов в положении, когда ось их симметрии совпадает с осью нагружения.

Поверку и градуировку средств измерения испытательной машины необходимо осуществлять в соответствии с нормами Методических указаний [3].

8.3 Секундомер для измерения длительности нагружения до разрушения с точностью до 1 с.

8.4 Термокамера испытательной машины. Реализуемый рабочий диапазон температур термокамеры: от минус 60°C до 160°C . Термокамера должна

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-159-2023	
СК	Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	Редакция №	1

обеспечивать в рабочем пространстве, находящемся между захватами испытательной машины, любую задаваемую температуру нагрева или охлаждения образца из указанного диапазона. Допускаемое отклонение от заданной температуры – не более $\pm 3^{\circ}\text{C}$ в течение периода температурной стабилизации.

8.5 Камера для кондиционирования. При кондиционировании образцов в условиях, отличающихся от лабораторных, требуется камера для кондиционирования, позволяющая создавать и поддерживать в пределах $\pm 3^{\circ}\text{C}$ на заданном уровне температуру в диапазоне от минус 60°C до 160°C и относительную влажность от 20% до 98% в пределах $\pm 3\%$. Условия в камере осуществляются либо автоматически, либо вручную через регулярные интервалы времени.

8.6 Нагружение образца производится через нагружающие пластины оснастки (Приложение А). Схема нагружения образца и расположения датчика деформаций представлены на рисунке 2.

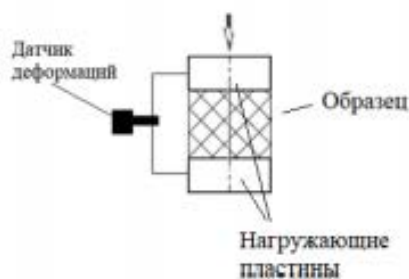


Рисунок 2 – Схема нагружения образца

9 Кондиционирование образцов

Кондиционирование образцов перед испытаниями следует проводить в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423, если в нормативно-технической документации на материал нет других указаний.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

Кондиционирование образцов, заключающееся в равновесном влагонасыщении при заданном уровне относительной влажности и температуры, рекомендуется выполнять в специализированных камерах (см. 8.5). В тех случаях, когда Заказчик не регламентировал условий кондиционирования, образцы считаются готовыми к испытанию в состоянии поставки.

В протоколе проведения испытаний (Приложение Б) должны быть описаны условия кондиционирования образцов с указанием содержания в образцах влаги. Если регламентированного кондиционирования не проводилось, то в протоколе проведения испытаний необходимо указать: «Образцы не кондиционированные, содержание влаги неизвестно».

10 Порядок проведения испытаний

10.1 При необходимости, кондиционировать образцы в соответствии с разделом 9 в условиях, согласованных с Заказчиком. Если условия кондиционирования отличаются от параметров окружающей среды в испытательной лаборатории, то образцы до проведения испытаний содержать в среде с контролируемыми параметрами.

10.2 При нагреве или охлаждении температуру, скорость нагрева и время выдержки при заданной температуре перед испытаниями установить в соответствии с техническим заданием на испытания.

10.3 Нагреть или охладить образец до требуемой температуры испытаний. Контроль температуры осуществлять с помощью термодатчиков. Длительность подбирать экспериментально посредством создания в контролируемой зоне образца условий стационарного теплообмена при заданной температуре и сохранения этих условий в течение 5 мин, когда температура в контролируемой зоне практически не меняется и находится в пределах допуска на различие температур $\pm 3^{\circ}\text{C}$.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

Если нагрева и охлаждения не требуется, то испытания проводить в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423.

10.4 Установить на испытательной машине требуемую скорость перемещения активного захвата, соответствующую скорости деформации, указанной в технических условиях. При отсутствии указания скорости нагружения в нормативных документах на материал рассчитать ее, исходя из следующего условия: предельная (разрушающая) деформации образца данного типа и материала должна быть достигнута в процессе монотонного сжатия образца в течение $3 \div 6$ мин. Рекомендуемая скорость нагружения для образцов является 0.5 мм/мин. После испытаний первых образцов из партии значение скорости уточнить и добиться требуемого значения.

10.5 Провести серию испытаний образцов с заданной скоростью перемещения активного захвата до их разрушения. При испытаниях непрерывно измерять и регистрировать нагрузку, удлинение образца и время процесса нагружения. Удлинение образца регистрировать по величине перемещения активного захвата.

10.6 Выполнить фотографирование испытанных образцов.

10.7 В протокол проведения испытаний занести разрушающую нагрузку, диаграмму «нагрузка–удлинение» каждого образца, а также описать вид разрушения образцов.

11 Обработка результатов испытаний

11.1 Предел прочности на сжатие σ_c , кгс/мм², вычисляют по формуле:

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A},$$

где:

P_{max} – максимальная нагрузка, кгс;

A – площадь поперечного сечения, мм².

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

11.2 Модуль сжатия E_c , кгс/мм², вычисляют по формуле:

$$E_c = \frac{St}{A},$$

где:

$S - \Delta P / \Delta u$ – наклон начального участка (0.1-0.3%) нагрузка-перемещение, кгс/мм;

u – перемещение пластин, мм;

t – толщина образца, мм.

11.2 Определить по ГОСТ 14359 выборочные среднее и коэффициент вариации.

11.3 Заполнить протокол проведения испытаний в соответствии с рекомендациями раздела 12

12 Оформление результатов испытаний

Протокол проведения испытаний должен включать следующие сведения:

12.1 Ссылка на настоящий стандарт и основание для проведения испытаний.

12.2 Описание испытываемых материалов и условия кондиционирования образцов.

12.3 Характеристика испытательного оборудования: информационно-измерительное оборудование, частота опроса датчиков; марка и мощность испытательной машины, скорость нагружения.

12.4 Относительная влажность и температура воздуха в испытательной лаборатории.

12.5 Условия испытаний, температура образца.

12.6 Размеры (ширина, длина и толщина) каждого образца.

12.7 Значение предела прочности каждого образца.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

12.8 Фамилии и имена исполнителей и дата испытания.

13 Требования по безопасности

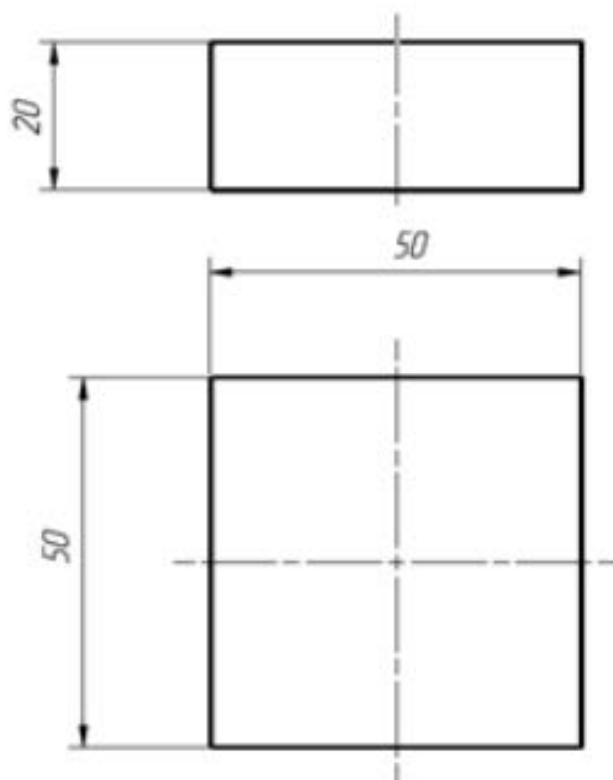
Данная методика не содержит предписаний по технике безопасности и охране здоровья. Если таковые окажутся необходимы при использовании данного стандарта, то это является ответственностью пользователя, который обязан самостоятельно разработать и установить все ограничения и средства, защищающие персонал, перед выполнением описываемых в стандарте процедур.

Наиболее важными направлениями этой разработки являются:

- меры безопасности от осколков при работе с хрупкими материалами;
- приемы безопасной работы с электроприборами, нагревателями и испытательными машинами;
- обеспечение экологической безопасности при испытании материалов, выделяющих продукты разложения при повышенных температурах, ГОСТ 12.4.021.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

Приложение А
Нагружающие пластины оснастки



ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-159-2023	
СК		Редакция №	1

Приложение Б (обязательное)

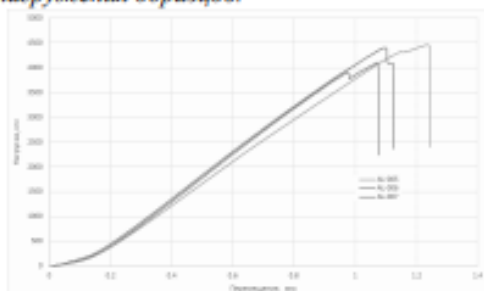
Форма протокола проведения испытаний

Адрес Телефон	Аккредитация		
	Номер	Дата	Организация
Заказчик			
Организация	Адрес	Телефон	Фамилия, И.О., должность

Протокол № ____ от _____

- 1 Метод проведения испытаний (номер стандарта испытаний и ссылка на него):
- 2 Образцы для испытания (тип/маркировка образцов, описание материала, укладка слоев ПКМ и тип заполнителя, условия кондиционирования):
- 3 Испытательное оборудование, условия испытаний (температурные режимы и скорость нагружения), кондиционирование образцов, температура и влажность в испытательной лаборатории:

- 4 Диаграмма нагружения образцов:



- 5 Результаты испытаний на:

№ образца	Длина L , мм	Ширина b , мм	Толщина t , мм	A , мм ²	P_{max} кгс	σ_c , кгс/мм ²	Вид разрушения
Среднее значение							
Коэффициент вариации, %							

Исполнители и дата

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-159-2023	
СК	Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей	Редакция №	1

Библиография

- [1] ASTM C 364-00 Standard Test Method for Flatwise Compressive Properties of Sandwich Cores.
- [2] ТР-1.4.1773–87 Механическая обработка деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов. Типовые операции технологических процессов
- [3] РД 50–482–84 Методические указания. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Методика поверки

Приложение Г

СТО СМК ФАУ «ЦАГИ»

Методика испытаний трехслойных панелей на торцевое сжатие



СТО СМК 7-160-2023

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор

К.И. Сыпало

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СИСТЕМА МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Конструкционные полимерные композиционные материалы

Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей

Редакция № 1

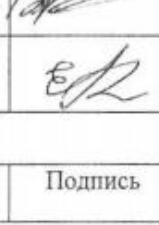
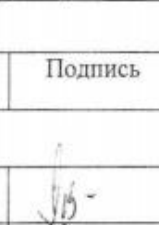
Дата введения « 18 » декабря 2023 г.,
приказ № 793 от « 18 » декабря 2023 г.

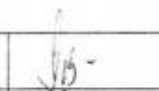
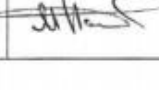
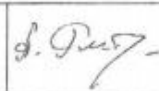
ФГУ «ЦАГИ»

2023

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ

№	Должность	И. О. Фамилия	Подпись	Дата
1				15.11.2023
2				13.11.2023
3				07.12.2023
4				07.12.2023
5				06.12.2023

№	Должность	И. О. Фамилия	Подпись	Дата
РАЗРАБОТАЛ				
1				30.11.2023
2				29.11.2023
3				28.11.2023
4	Научный сотрудник отдела № 5 НИО-18	М. В. Павлов		28.11.2023
ПРОВЕРИЛ				
5				05.12.2023

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

Предисловие

1.РАЗРАБОТАН И УТВЕРЖДЕН Федеральным автономным учреждением «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского»

2. ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

3.ДЕРЖАТЕЛЬ ПОДЛИННИКА документа – отдел стандартизации и унификации службы качества

4. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ПРОВЕРКИ – не реже, чем через 5 лет.

5. РАССЫЛКА документа – подлинник и контрольный экземпляр в отдел стандартизации и унификации, учтенные экземпляры в подразделения института, в соответствии с приказом о внедрении СТО СМК.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-160-2023	
СК	Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	Редакция №	1

Содержание

1	Назначение и область применения.....	5
2	Нормативные ссылки.....	5
3	Термины, определения и сокращения	6
4	Обозначения	7
5	Объект испытаний	7
6	Метод испытаний.....	7
7	Образцы для испытаний.....	7
8	Средства испытаний	9
9	Кондиционирование образцов.....	12
10	Порядок проведения испытаний	13
11	Обработка результатов испытаний	14
12	Оформление результатов испытаний.....	15
13	Требования безопасности.....	16
	Приложение А	17
	Приложение Б	18
	Библиография	19
	Лист ознакомления.....	20

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-160-2023	
СК	Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	Редакция №	1

1 Назначение и область применения

Стандарт устанавливает метод определения свойств материала трехслойных панелей при проведении испытаний на торцевое сжатие в условиях нормальной, пониженной и повышенной температур при монотонном статическом нагружении образцов до разрушения.

Настоящий стандарт используется для определения предела прочности трехслойной панели в направлении параллельно внешним обшивкам. Характеристики и свойства, определяемые рассматриваемым методом испытаний, вводят в технические условия на материал, используют при паспортизации, создании баз данных, а также в исследованиях и разработках при создании авиационной техники.

Данный документ является стандартом организации в системе менеджмента качества ФАУ «ЦАГИ», разработанным с учетом требований ГОСТ Р ИСО 9000, ГОСТ Р ИСО 9001 и ДП СМК 4-00.

Требования настоящего документа являются обязательными для всех работников института, чья деятельность касается исследований характеристик и свойств трехслойных панелей из полимерных композиционных материалов.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ Р ИСО 9000-2015	Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь
ГОСТ Р ИСО 9001-2015	Системы менеджмента качества. Требования
ГОСТ 28840-90	Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

ГОСТ 6507-90	Микрометры. Технические условия
ГОСТ 166-89	Штангенциркули. Технические условия
ГОСТ 12423-2013	Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов (проб)
ГОСТ 12.4.021-75	Система стандартов безопасности труда. Системы вентиляционные. Общие требования
ДП СМК 4-00-2023	Система менеджмента качества. Руководство по качеству организации и обеспечения исследований, испытаний, производства и других работ, выполняемых в институте
ГОСТ 14359-69	Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования.

Все указанные документы используются в работе в их последней действующей редакции.

3 Термины, определения и сокращения

В настоящем стандарте используются термины и определения, приведенные в ГОСТ Р ИСО 9000.

В настоящем стандарте применяются следующие сокращения:

ГОСТ	– Государственный стандарт;
ИСО	– Международная организация по стандартизации;
ЛА	– Летательный аппарат (летательные аппараты);
НИО	– Научно-исследовательское отделение;
ПКМ	– Полимерный композиционный материал;
РД	– Руководящий документ;
СК	– Служба качества;
СМК	– Система менеджмента качества;
СТО	– Стандарт организации;
ТР	– Технический регламент;
ФАУ ЦАГИ	– Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского».

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

4 Обозначения

В настоящем стандарте применяются следующие обозначения:

- 4.1 σ_B , кгс/мм²: Предел прочности при торцевом сжатии.
- 4.2 P , кгс: Максимальная нагрузка, вызвавшая разрушение образца.
- 4.2 W , мм: Измеренная ширина образца.
- 4.3 t , мм: Измеренная толщина образца.

5 Объект испытаний

Объектом испытаний являются трехслойные (сотовые) панели с обшивкой из ПКМ армированного углеродными, стеклянными или органическими волокнами, наполнитель – непрерывного или ячеистого типа. Панели имеют общую толщину, укладку слоев армирующих наполнителей в обшивке и наполнитель аналогичный тому, который используется в композитных конструкциях конкретных изделий.

6 Метод испытаний

Метод заключается в определении свойств трехслойной панели при воздействии одноосной сжимающей нагрузки параллельно обшивкам с установленной скоростью деформирования до разрушения.

Основные положения настоящего метода испытаний соответствуют (гармонизированы с) ASTM C 364-00 [1].

7 Образцы для испытаний

7.1 Стандартом предусмотрено проведение испытаний образцов трехслойных панелей в виде прямоугольных пластин (рисунок 1). Длина и ширина образца выбирается из расчета того, что она должна быть больше или равна 8 толщинам трехслойной панели.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

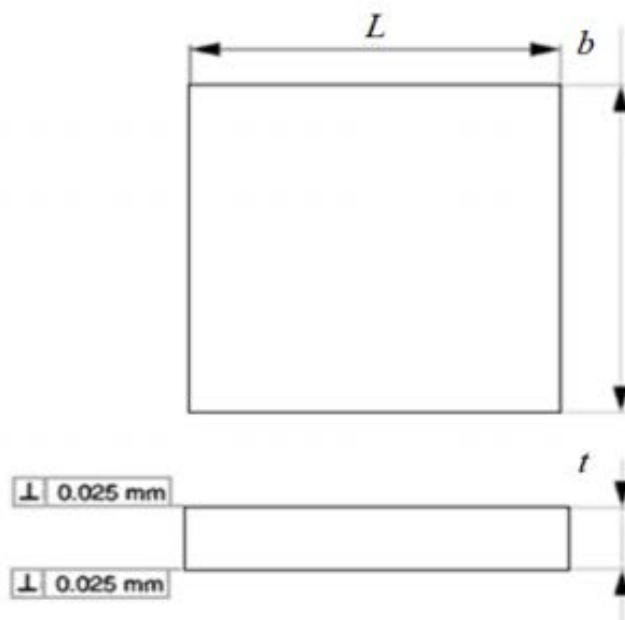


Рисунок 1 – Образец трехслойной панели для испытаний

7.2 Для одних условий испытания количество образцов должно быть не менее пяти.

7.3 Механическую обработку образцов необходимо выполнять, руководствуясь Техническим регламентом [2]. При вырезании образца из панели большего размера необходимо тщательно подобрать метод механической обработки, позволяющий исключить образование зазубрин, подрезов, грубых, неровных поверхностей, а также расслоений. Окончательные размеры получать точным выпиливанием, фрезерованием, или шлифованием с обязательной подачей охлаждающей жидкости в обрабатываемую зону. Общие требования к результатам механической обработки заключаются в следующем: обработанные торцы образца должны быть плоскими и находится в пределах перпендикулярности, рисунок 1.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

7.4 Для предотвращения местного смятия трехслойной панели в процессе нагружения, открытые стороны заполнителя могут быть усилены тонким слоем связующего аналогичного используемого при формовке трехслойной панели, рисунок 2.

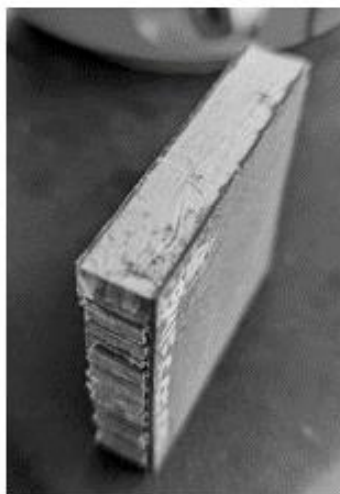


Рисунок 2 – Усиление открытых торцов образца

7.5 Изготовленные образцы маркировать номером партии и порядковым номером образца на обшивке. Маркировка должна не только позволять отличать образцы друг от друга и указывать на их происхождение, но также идентифицировать их по условиям испытаний. Маркировка не должна влиять на выполнение и результат испытаний, но и при этом не должна повреждаться.

8 Средства испытаний

При проведении испытаний образцов используются:

8.1 Микрометры и штангенциркули – для измерений длины, ширины и толщины образца следует пользоваться мерительным инструментом, который обеспечивает возможность определения указанных размеров с точностью до $\pm 1\%$ от измеряемой величины. Для измерения толщины образца использовать микрометр типов МК или МЛ по ГОСТ 6507. Диапазон измерения от 0 до 25 мм

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

с погрешностью до ± 0.01 мм. Измерения длины и ширины образца выполнять штангенциркулем по ГОСТ 166 с подходящим диапазоном измерения и погрешностью до ± 0.1 мм.

8.2 Испытательная машина, которая должна отвечать требованиям ГОСТ 28840, позволяющая осуществлять нагружение образца с постоянной скоростью обеспечивая измерение нагрузки и перемещения с точностью до ± 1 % от измеряемой величины.

Основные элементы и узлы испытательной машины:

- неподвижная траверса с захватом для образца.
- силовозбудитель, предназначенный для перемещения активного захвата с управляемой скоростью по отношению к неподвижной траверсе и способный преодолевать при этом сопротивление деформации образца.
- силоизмеритель – механическое, электромеханическое или механико-гидравлическое устройство, позволяющее измерять и регистрировать нагрузку, создаваемую силовозбудителем для растяжения испытуемого образца. Данное устройство должно быть безынерционным (в пределах реализуемых скоростей нагружения) отображать текущую величину нагрузки с точностью до $\pm 1\%$ от измеренной величины.
- регистрирующее устройство – электронная аппаратура, обеспечивающая синхронную запись сигналов силоизмерителя и датчика перемещения активного захвата, что позволяет строить диаграммы "нагрузка–удлинение" для испытываемых образцов.
- активный (подвижный) захват образца, связанный силовым механизмом перемещения с управляемой скоростью.

Захваты должны обеспечивать надежное крепление образцов в положении, когда ось их симметрии совпадает с осью нагружения.

Поверку и градуировку средств измерения испытательной машины необходимо осуществлять в соответствии с нормами Методических указаний [3].

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

8.3 Секундомер для измерения длительности нагружения до разрушения с точностью до 1 с.

8.4 Термокамера испытательной машины. Реализуемый рабочий диапазон температур термокамеры: от минус 60⁰С до 160⁰С. Термокамера должна обеспечивать в рабочем пространстве, находящемся между захватами испытательной машины, любую задаваемую температуру нагрева или охлаждения образца из указанного диапазона. Допускаемое отклонение от заданной температуры – не более $\pm 3^{\circ}\text{C}$ в течение периода температурной стабилизации.

8.5 Камера для кондиционирования. При кондиционировании образцов в условиях, отличающихся от лабораторных, требуется камера для кондиционирования, позволяющая создавать и поддерживать в пределах $\pm 3^{\circ}\text{C}$ на заданном уровне температуру в диапазоне от минус 60⁰С до 160⁰С и относительную влажность от 20% до 98% в пределах $\pm 3\%$. Условия в камере осуществляются либо автоматически, либо вручную через регулярные интервалы времени.

8.6 Проводить нагружение образца рекомендуется через специальные зажимные опоры (Приложение А). Схема нагружения образца при испытании на торцевое сжатие представлена на рисунке 3.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

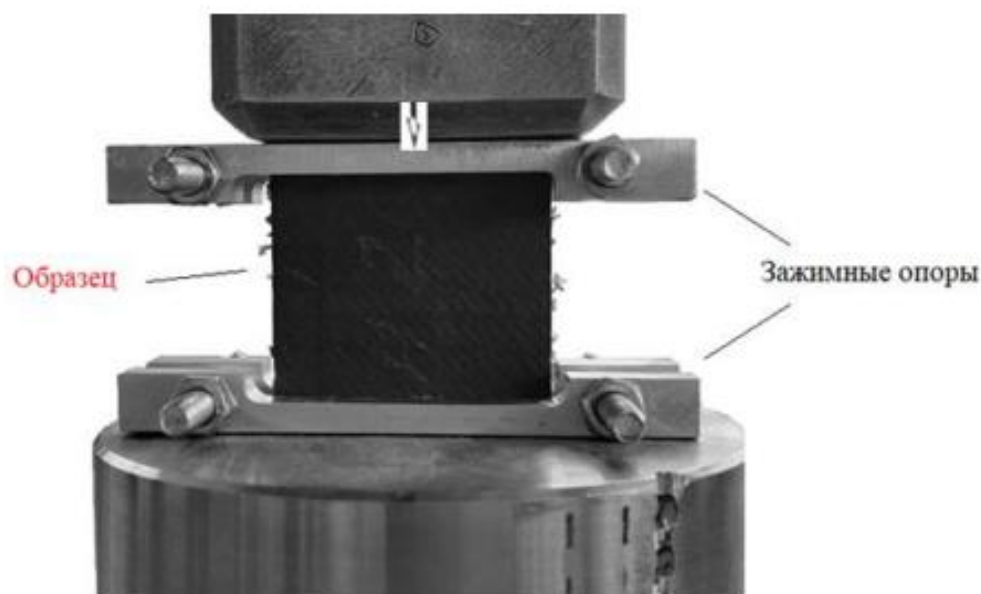


Рисунок 3 – Схема нагружения образца при испытании на торцевое сжатие

9 Кондиционирование образцов

Кондиционирование образцов перед испытаниями следует проводить в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423, если в нормативно-технической документации на материал нет других указаний. Кондиционирование образцов, заключающееся в равновесном влагонасыщении при заданном уровне относительной влажности и температуры, рекомендуется выполнять в специализированных камерах (см. 8.5). В тех случаях, когда Заказчик не регламентировал условий кондиционирования, образцы считаются готовыми к испытанию в состоянии поставки.

В протоколе проведения испытаний (Приложение Б) должны быть описаны условия кондиционирования образцов с указанием содержания в образцах влаги. Если регламентированного кондиционирования не проводилось, то в протоколе проведения испытаний необходимо указать: «Образцы не кондиционированные, содержание влаги неизвестно».

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

10 Порядок проведения испытаний

10.1 При необходимости, кондиционировать образцы в соответствии с разделом 9 в условиях, согласованных с Заказчиком. Если условия кондиционирования отличаются от параметров окружающей среды в испытательной лаборатории, то образцы до проведения испытаний содержать в среде с контролируемыми параметрами.

10.2 При нагреве или охлаждении температуру, скорость нагрева и время выдержки при заданной температуре перед испытаниями установить в соответствии с техническим заданием на испытания.

10.3 Нагреть или охладить образец до требуемой температуры испытаний. Контроль температуры осуществлять с помощью термопар. Длительность подбирать экспериментально посредством создания в контролируемой зоне образца условий стационарного теплообмена при заданной температуре и сохранения этих условий в течение 5 мин, когда температура в контролируемой зоне практически не меняется и находится в пределах допуска на различие температур $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Если нагрева и охлаждения не требуется, то испытания проводить в стандартной лабораторной атмосфере 23/50 по ГОСТ 12423.

10.4 Установить на испытательной машине требуемую скорость перемещения активного захвата, соответствующую скорости деформации, указанной в технических условиях. При отсутствии указания скорости нагружения в нормативных документах на материал рассчитать ее, исходя из следующего условия: предельная (разрушающая) деформации образца данного типа и материала должна быть достигнута в процессе монотонного растяжения образца в течение $3 \div 6$ мин. Рекомендуемая скорость нагружения для образцов является 0.5 мм/мин. После испытания первых образцов из партии значение скорости уточнить и добиться требуемого значения.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

10.5 Допустимой модой разрушения считается только та, которая произошла вдали ($T_s \leq t$) от нагружаемых торцов трехслойной панели, таблица 1. Потеря устойчивости обшивки является допустимым разрушением, так же допускается разрушение обшивок и заполнителя от сжатия и сдвига, таблица 1.

Таблица 1 – Допустимое и недопустимое разрушение образца

Недопустимое разрушение	Допустимое разрушение			
				
Разрушение находится слишком близко $T_s \leq t$	Потеря устойчивости обшивки	Разрушение обшивки	Разрушение заполнителя от сжатия	Разрушение заполнителя от сдвига

10.6 Провести серию испытаний образцов с заданной скоростью перемещения активного захвата до разрушения. При испытаниях непрерывно измерять и регистрировать нагрузку.

10.7 Выполнить фотографирование испытанных образцов.

10.8 В протокол проведения испытаний занести разрушающую нагрузку, диаграмму «нагрузка–удлинение» каждого образца, а также описать вид разрушения образцов.

11 Обработка результатов испытаний

11.1 Предел прочности на торцевое сжатие σ_b , кгс/мм², вычисляют по формуле:

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

$$\sigma_{\text{в}} = \frac{P_{\text{max}}}{[w(2t)]},$$

где:

P_{max} – максимальная нагрузка, кгс;

w – измеренная ширина образца, мм;

t – измеренная толщина образца, мм.

11.2 Определить по ГОСТ 14359 выборочные среднее и коэффициент вариации.

11.3 Заполнить протокол проведения испытаний в соответствии с рекомендациями раздела 12.

12 Оформление результатов испытаний

Протокол проведения испытаний должен включать следующие сведения:

12.1 Ссылка на настоящий стандарт и основание для проведения испытаний.

12.2 Описание испытываемых материалов и условия кондиционирования образцов.

12.3 Характеристика испытательного оборудования: информационно-измерительное оборудование, частота опроса датчиков; марка и мощность испытательной машины, скорость нагружения.

12.4 Относительная влажность и температура воздуха в испытательной лаборатории.

12.5 Условия испытаний, температура образца.

12.6 Размеры (ширина, длина и толщина) каждого образца.

12.7 Значение предела прочности каждого образца.

12.8 Фамилии и имена исполнителей и дата испытания.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-160-2023	
СК	Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	Редакция №	1

13 Требования безопасности

Данная методика не содержит предписаний по технике безопасности и охране здоровья. Если таковые окажутся необходимы при использовании данного стандарта, то это является ответственностью пользователя, который обязан самостоятельно разработать и установить все ограничения и средства, защищающие персонал, перед выполнением описываемых в стандарте процедур.

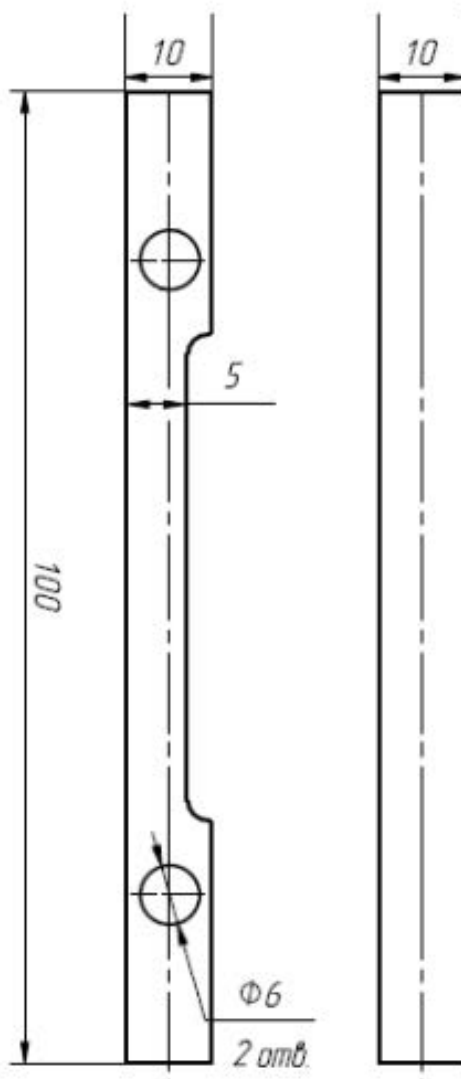
Наиболее важными направлениями этой разработки являются:

- меры безопасности от осколков при работе с хрупкими материалами;
- приемы безопасной работы с электроприборами, нагревателями и испытательными машинами;
- обеспечение экологической безопасности при испытании материалов, выделяющих продукты разложения при повышенных температурах, ГОСТ 12.4.021.

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

Приложение А

Эскиз оснастки для испытаний на торцевое сжатие



ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.	СТО СМК 7-160-2023	
СК	Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	Редакция №	1

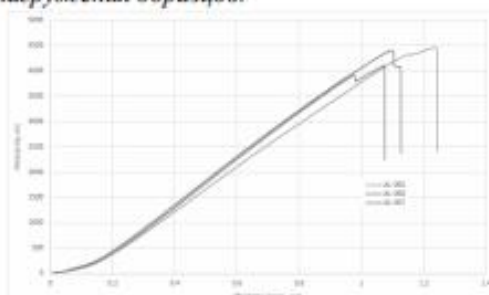
Приложение Б (обязательное)

Форма протокола проведения испытаний

Адрес Телефон	Аккредитация		
	Номер	Дата	Организация
Заказчик			
Организация	Адрес	Телефон	Фамилия, И.О., должность

Протокол № ____ от _____

- 1 Метод проведения испытаний (номер стандарта испытаний и ссылка на него):
- 2 Образцы для испытания (тип/маркировка образцов, описание материала, укладка слоев ПКМ и тип заполнителя, условия кондиционирования):
- 3 Испытательное оборудование, условия испытаний (температурные режимы и скорость нагружения), кондиционирование образцов, температура и влажность в испытательной лаборатории:
- 4 Диаграмма нагружения образцов:



- 5 Результаты испытаний на:

№ образца	Длина L , мм	Ширина b , мм	Толщина t , мм	A , мм ²	P_{max} , кгс	σ_T , кгс/мм ²	Вид разрушения
Среднее значение							
Коэффициент вариации, %							

Исполнители и дата

ФАУ «ЦАГИ»	КОНСТРУКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей	СТО СМК 7-160-2023	
СК		Редакция №	1

Библиография

- [1] ASTM C 364-00 Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions.
- [2] ТР–1.4.1773–87 Механическая обработка деталей и агрегатов из полимерных композиционных материалов. Типовые операции технологических процессов
- [3] РД 50–482–84 Методические указания. Машины разрывные и универсальные для статических испытаний металлов и конструкционных пластмасс. Методика поверки

Приложение Д

Федеральное автономное учреждение
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени профессора Н.Е. Жуковского»
(ФАУ «ЦАГИ»)

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

результатов диссертационной работы Павлова М.В.

«Методики определения расчетных характеристик трехслойных
материалов для обеспечения статической прочности конструкции
летательного аппарата»

В рамках выполнения диссертационной работы Павловым М.В. разработаны и выпущены методики по испытаниям трёхслойных материалов, которые успешно введены в действие в рамках системы менеджмента качества ФАУ «ЦАГИ» под следующими номерами:

- СТО СМК 7-157-2023 «Конструкционные Полимерные Материалы. Метод испытания на растяжение материала трехслойных панелей»
- СТО СМК 7-158-2023 «Конструкционные Полимерные Материалы. Метод испытания на сдвиг материала трехслойных панелей»
- СТО СМК 7-159-2023 «Конструкционные Полимерные Материалы. Метод испытания на сжатие материала трехслойных панелей»
- СТО СМК 7-160-2023 «Конструкционные Полимерные Материалы. Метод испытания на торцевое сжатие материала трехслойных панелей»

Использование разработанных Павловым М.В. методик испытаний позволило повысить научно-технический уровень обеспечения специальной квалификации композиционных материалов и устранить пробелы в отечественной нормативной базе.

Заместитель генерального директора по науке,
и.о. начальника центра прочности ЛА



М.Ч. Зиченков

Рисунок Д.1- Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ФАУ
«ЦАГИ»

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель
главного конструктора МС-21
ПАО «Яковлев»



А.В. Бучкин

2025 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы «Методики определения расчетных характеристик трехслойных материалов для обеспечения статической прочности конструкции летательного аппарата» М.В. Павлова в ИЦ ПАО «Яковлев»

Павлов Михаил Валерьевич является сопровождающим работ от ФАУ «ЦАГИ» по направлению специальной квалификации материалов и полуфабрикатов, применяемых в конструкции самолета семейства МС-21. В рамках выполнения данных работ Павловым М.В. было получено большое количество расчетно-экспериментальных результатов, которые были использованы при формировании научно-технического и методического задела инженерного центра ПАО «Яковлев». В частности, результаты работ были применены при выпуске расчетных характеристик полимерных композиционных материалов, применяемых в основных силовых элементах конструкции самолета МС-21 1211-0000-0000-101-0D90, а также при разработке программы специальной квалификации полимерных композиционных материалов, применяемых при изготовлении панелей пассажирского пола и БГО 1231-5300-0000-008-00ТМ.

Начальник отделения - Заместитель
главного конструктора по прочности

 П.Н. Гусев

Начальник отдела разработки
алгоритмов и программ

 Е.И. Смагин

Рисунок Д.2- Акт о внедрении результатов диссертационной работы в ПАО «Яковлев»